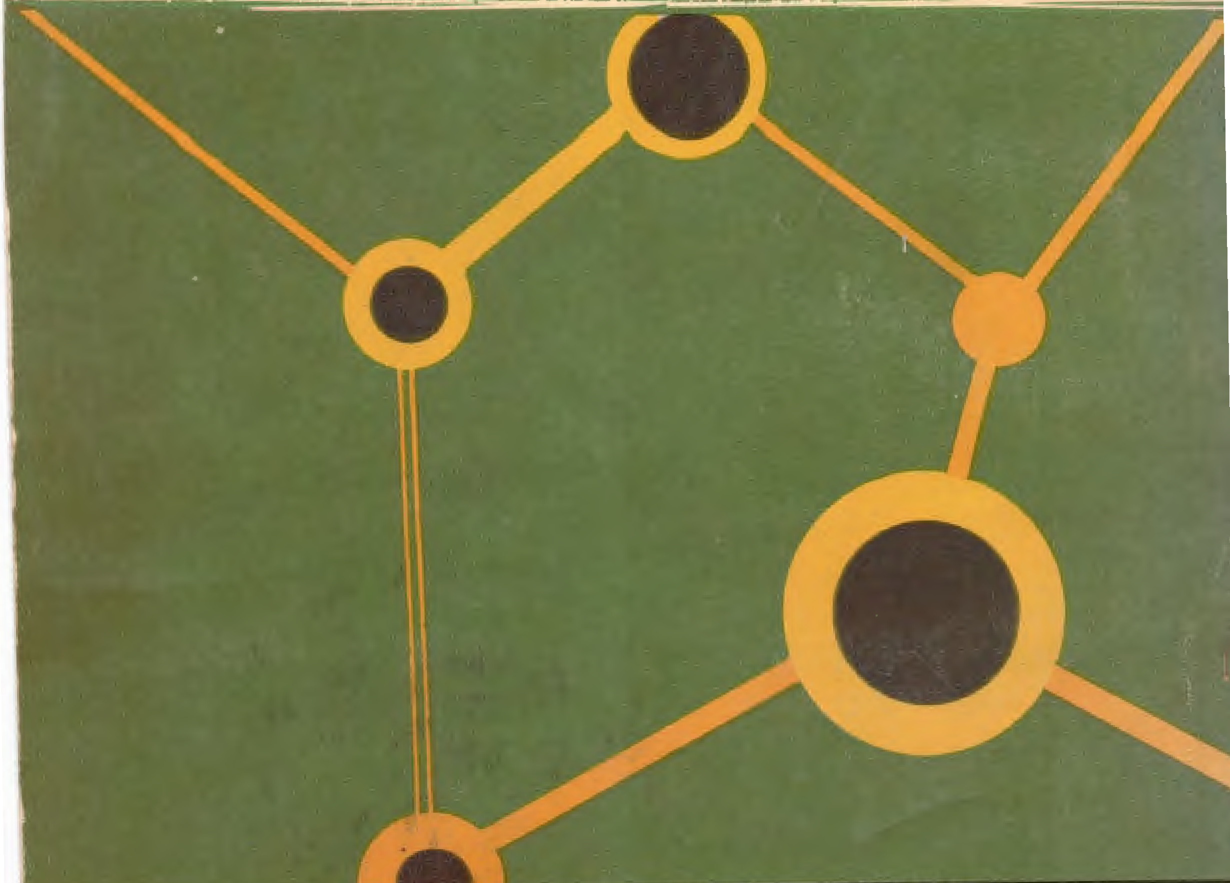
المبادئ الأساسية للفيزياء الذرية



تأليف : ريتشارد ف. همفريز   روبرت بيرنجر

ترجمة : الدكتور سيد رمضان هدارة   الدكتور محمود أمين عمر   الدكتور يوسف ليتو

راجعه : الدكتور محمود مختار

دار المعارف

نشر هذا الكتاب بالاشتراك

مع

مؤسسة فرانكلين للطباعة والنشر

القاهرة — نيويورك

سنة ١٩٦٢

المبادئ الأساسيّة
للفيزياء الذرّيّة

تأليف

ريتشارد ف. همفريز — روبرت بير نجر

ترجمة

الدكتور محمود أمين عمر
أستاذ الفيزياء – كلية البنات
جامعة عين شمس

الدكتور يوسف ليتو
أستاذ الفيزياء المساعد – كلية العلوم
جامعة القاهرة

الدكتور سيد رمضان هدارة
أستاذ الفيزياء المساعد – كلية العلوم – جامعة القاهرة

مراجعة

الدكتور محمود مختار
أستاذ الفيزياء ووكيل كلية العلوم – جامعة القاهرة

دار المعارف بمصر
١٩٦٢

هذه الترجمة مرخص بها ، وقد قامت مؤسسة فرانكلين للطباعة والنشر بشراء
حق الترجمة من صاحب هذا الحق .

This is an authorized translation of FIRST PRINCIPLES OF ATOMIC PHYSICS by Richard F. Humphreys and Robert Beringer. Copyright, 1950, by Harper & Brothers. Published by Harper & Brothers, New York.

ملتزم الطبع والنشر : دار المعارف بمصر – ١١١٩ كورنيش النيل – القاهرة ج. ع. م.

المحتويات

الجزء الثالث : الظواهر الذرية والنووية : الصفحة

المشتركون فى هذا الكتاب

المؤلفان

ريتشارد فرانكلين همفريز :

عالم فيزيقى ولد فى جرينفيل سنة ١٩١١، حصل على درجة A.B. سنة ١٩٣٣ ، وعلى درجة M.A. من جامعة سيراكوز سنة ١٩٣٦ و Ph.D. من جامعة ييل سنة ١٩٣٩ . وبدأ حياته العملية مدرساً لعلم الفيزياء فى جامعة سيراكوز بنيويورك حيث مكث فيها من سنة ١٩٣٩ إلى سنة ١٩٤٠ ، ثم انتقل منها إلى جامعة ييل وعين أستاذاً بها حتى سنة ١٩٤٩ . ثم زاول أعمالا أخرى لها صلة بالفيزياء ، فضلا عن تعيينه عضواً فى عدة جمعيات ونواد علمية . وفى سنة ١٩٥٠ ألف كتاب (المبادىء الأساسية للفيزياء الذرية) وذلك بالاشتراك مع إدوارد برينجر خلاف بعض نشرات فى العلوم .

البروفسور ادوارد روبرت برينجر :

أستاذ علم الفيزيقا فى جامعة ييل . ولد فى بيتزبرج ببنسلفانيا فى عام ١٩١٧ ، وتزوج فى عام ١٩٤٢ . حصل على درجة Ph.D. من جامعة واشنجتون و B.Sc. من جامعة ييل ، وعين مساعداً فى معمل الأشعة التابع لمعهد مساشوستس التكنولوجى ، ثم مساعد أستاذ للفيزيقا بجامعة ييل وعمل بعض الوقت فى المكتب الرسمى للبحوث العلمية ، وكذلك فى مكتب البحوث التابعة للبحرية فى سنة ١٩٤٤ .

المترجمون

الدكتور محمود أمين عمر :

حصل على بكالوريوس التخصص فى علم الطبيعة مع درجة الشرف من جامعة مانشستر سنة ١٩٣١ ، وحصل على الدكتوراه فى علم الضوء من جامعة

لندن . تدرج فى مناصب التدريس حتى وصل إلى منصب أستاذ فى الطبيعة بكلية البنات بجامعة عين شمس . وفى عام ١٩٥٨ عين وكيلا لكلية البنات ، وفى سنة ١٩٦٠ انتدب أستاذاً للطبيعة بجامعة الملك سعود بالرياض .

الدكتور يوسف ليتو :

تخرج فى كلية العلوم ، جامعة القاهرة عام ١٩٣٦ وكانت الطبيعة مادة تخصصه . حصل على درجة ماجستير العلوم ، ودكتوراه الفلسفة من جامعة القاهرة ، وذلك فى عامى ١٩٤٢ و ١٩٤٧ على التوالى . تدرج فى مناصب التدريس حتى شغل منصب أستاذ مساعد فى سنة ١٩٥٢ . وقد شمل نشاطه التعليمى تأليف وترجمة عدد من الكتب ، بعضها ذو طابع دراسى ، وبعضها يستهدف نشر الثقافة العلمية الشعبية .

الدكتور سيد رمضان هدارة :

حصل على درجة البكالوريوس فى الطبيعة الخاصة من كلية العلوم بجامعة القاهرة عام ١٩٤٢ ، وعلى درجة الماجستير فى الطبيعة من جامعة القاهرة عام ١٩٤٦ ، وعلى درجة دكتوراه الفلسفة فى الطبيعة من جامعة مانشستر عام ١٩٥٠ . يعمل أستاذاً مساعداً بقسم الطبيعة بكلية العلوم بجامعة القاهرة التى التحق بها منذ تخرجه . له بحوث علمية متعددة نشرت له فى المجلات العلمية ، كما ترجم عدداً من الكتب العلمية ، من بينها «العلم للمواطن» و «الطبيعة النووية» .

المراجع

الدكتور محمود مختار :

تخرج عام ١٩٢٩ فى الدفعة الأولى بكلية العلوم بجامعة القاهرة بمرتبة الشرف فى علم الفيزياء والرياضة . حصل على درجة الماجستير عام ١٩٣٥ من جامعة

القاهرة ، وعلى درجة الدكتوراه من جامعة درهام بإنجلترا عام ١٩٣٩ . تدرج في وظائف التدريس بكلية العلوم حتى شغل كرسى الفيزياء ، وعين رئيساً للقسم فى عام ١٩٥٠ ولا يزال يشغل هذا المنصب حتى الآن . عمل وكيلا للكلية منذ عام ١٩٥٥ حتى الآن ، وفضلا عن عمله فى كلية العلوم يساهم الدكتور مختار بنشاطه فى كثير من الجمعيات والهيئات العلمية . كما قام بترجمة عديد من المراجع العلمية فى علم الفيزياء ، وبتأليف كثير من الكتب العلمية باللغتين العربية والإنجليزية .

مصمم الغلاف

أمين لبيب رزق :

التحق بكلية الفنون الجميلة « قسم الفنون الزخرفية » سنة ١٩٥٦ ، اشترك فى عدة مسابقات أهمها الدعاية والإعلان لمصلحة السياحة وطوابع البريد والدعاية للمؤتمرات العامة التى أقيمت فى الجمهورية العربية ، حصل على جائزة التقدير لإعلان الدعاية لمؤتمر الشباب الأفريقى الآسيوى . اشترك ببعض التصميمات فى معرض للجمهورية العربية المتحدة فى روما سنتى ١٩٥٩ و ١٩٦١ .

مقدمة المترجمين

لا جدال فى أن مولد العلم فى مطلع العصور الحديثة قد أحدث ثورة عارمة فى التفكير المنطقى السليم ، وذلك بإحلال التجربة العلمية محل الشعوذة والخرافات التى كانت تكتنف نواحى الفكر وتسدل عليه ستاراً كثيفاً من الغموض والإبهام تحت أسماء خادعة من الروحانيات وما إليها .

وقد اتفق المؤرخون ، على أن مولد العلم قد بدأ عند ما هاجم « كبلر » و « جاليليو » و « نيوتن » الخرافة السائدة فى العصور الأولى بأن « القوانين التى تحكم الأجرام السماوية تتسم بالحكمة والتعقل ، أما تلك التى تحكم الظواهر الأرضية فإنها تتسم بالتخبط والمجون » ، فكانوا هم أول من نادى بأن القوانين التى تحكم الأجرام السماوية هى بنفسها التى تحكم كل ما يحدث على الأرض .

وكان هذا هو الأساس الذى بنوا عليه الهيكل العظيم للعلم الحديث . ثم ما لبث البناء أن ارتفعت جدرانه بوضع لبنة تلو أخرى حتى برزت معالمه واشتدت أواصره . ولكن ما إن بزغت شمس هذا القرن العشرين حتى وضحت عقبات كأداء وقفت بالبناء فترة طويلة ، وكان على العلماء أن يواجهوها بقوة وتعمق ، إذا ما أرادوا لبنائهم أن يرتفع أكثر فأكثر ، بعد أن استنفدت ميكانيكا نيوتن أغراضها ولم تعد تقوى على المزيد .

وفى مطلع هذا القرن ، وضع « أينشتين » و « بلانك » نظريتى « النسبية » و « الكمية » اللتين ارتفعتا بالبناء من طوابق قليلة إلى ناطحات سحاب . وكانت لكل منهما آثارها الفلسفية العميقة ، التى لم تقتصر على علم الفيزياء وحده ، بل تعدته إلى نواح أخرى عديدة من المعرفة والعلم .

وقد اختلفت ، بطبيعة الحال ، صورة العلم والعلماء فى الزمن الماضى عنها فى الزمن الحاضر كل الاختلاف . فبعد أن كان العلم وقفاً على أفراد معدودين

يعزلون أنفسهم فى أبراج عاجية بحثاً وراء مكنونات الطبيعة ، إذا بالعلم اليوم يغزو كل مكان فيحيل ظلمته إلى نور ، ويدخل كل حرفة فيبعث فيها الحياة بعد طول ركود . وظهرت تكنية (تكنولوجية) العلم ودخلت حياتنا من كل ناحية وصوب ، فملأتها بهجة وراحة وأمناً وصحة ، وخرج العالم من صومعته العاجية ليعيش فى مجتمع تعاونى اجتماعى ، يتفاعل مع كل ما حوله ويتجاوب مع كل من حوله .

وبرز عالم الفيزياء بصفة خاصة ، بوصفه المسئول الأول عن هذا التطور الضخم بالكشف عن الطاقة الذرية وأسرارها ليأخذ مكانه فى المساهمة فى بناء هذا المجتمع الذرى الجديد . وكما قال « برتراند رسل » فى إحدى مقالاته الحديثة . . « من الخطأ أن يقول العالم فى هذا العصر الحديث : إن مهمتى مقصورة على البحث العلمى ، أما ما يترتب عليه من آثار فخارج عن نطاقى . إن على العالم أن يرعى دائماً كشوفه ومستحدثاته بعين ساهرة ولا يتركها فريسة لمن لا يحسن استخدامها أو لمن يوجهها وجهة غير إنسانية » .

ولا شك أن مؤلفى هذا الكتاب قد نجحا فى إبراز ناحية خاصة من العلم الحديث شغلت الرأى العام المثقف ، والمجتمع الإنسانى بصفة عامة ، بما أحدثته فيه من آثار سياسية واقتصادية واجتماعية بعيدة المدى . فقد أعطيا فى هذا الكتاب صورة مبسطة متكاملة عن المبادئ الأساسية للفيزياء الذرية ، وضح فيها المنطق السليم والتفكير العميق الذى اتسم به هذا العلم ، فخرجت صورة شائقة جمعت بين دسامة المادة وسهولة العرض ، وأهدياها بصفة خاصة ، إلى رجال الأدب والفلسفة والعلوم الاجتماعية والإنسانية ومن إليهم ممن شهدوا معنا فجر هذا العصر الذرى الحديث ، وعاشوا تحت أضوائه الخاطفة ، وتفاعلوا مع أحداثه حلوها ومرها . وبهذه الصورة خرج رجال العلم من صومعتهم التقليدية القديمة ليتعاونوا مع رجال الفكر فى بناء مجتمع علمى أدبى واحد خال من الفوارق والحواجز المصطنعة بينهم .

سبتمبر ١٩٦٠ المترجمون

مقدمة المؤلفين

وضع هذا الكتاب كمقدمة لدراسة الفيزياء لطلبة العلوم الإنسانية والاجتماعية. والغرض الأساسى منه هو تمثيل وجهة نظر الفيزيائى الحديثة عن العالم الطبيعى الخارجى ، فى الوقت المحدود الذى يستطيع أن يكرسه الطالب العام لمثل هذه الدراسة ، وبدون أن يدلى الفيزيائى بأداته التحليلية كاملة فى الميدان .

إن المنهج الإعدادى لطالب العلوم يختلف عنه للطالب العام . فحيث يلزم لطالب العلوم منهج يهيء له مجال الدراسة المستقبلة المستفيضة . إذ يلزم للطالب العام مقرر نهائى ، يرمى إلى إعطائه صورة تمكنه من الإلمام بجميع النواحى التى يدخلها فى إطار معلوماته العامة . وقد استخدمت لهذا الهدف طريقتان هما :

الأولى : طريقة العرض الاستقصائى العام .

والثانية : طريقة العرض التاريخى أو الفلسفى للعلم .

ونحن لا نقر أى الطريقتين إقراراً تاماً ، لعدم التجائهما للوسائل العلمية فى معالجة الظواهر الفيزيائية ، فالفرق بعيد بين تدريس العلم والتدريس حول العلم . وقد اخترنا أن ندرس العلم ، آخذين فى اعتبارنا الالتزامات التى يتطلبها وجود مقرر واحد لغير المختصين ، وذلك باختيارنا لجزء من علم الفيزياء يمكن بناؤه منطقياً ، يهدف إلى نهاية تكاد تكون محددة .

وللوصول إلى هذا الغرض لم نحاول أن نكون متفقهين . بل على العكس ، فإننا قد استفضنا فى شرح إحدى نواحى الفكر الهامة فى هذا الكتاب — وهى المتعلقة بعالم الذرة من وجهة النظر الفيزيائية — وذلك بالالتجاء إلى المعلومات الضرورية المستقاة من قواعد الفيزياء العامة أو الماكروفيزياء ، بقدر ما هى داخلة فقط ، فى دراسة الفيزياء الذرية . وقد حذفنا ما يدرس فى العادة كمقررات الفيزياء ، وأدخلنا الكثير مما لا يوجد عادة بكتب الدراسة الأولية ، بغرض التمكن من عرض

وحدة متكاملة من علم الفيزياء ، بدلا من عرض مختصرات لمنهج إعدادى . فالخطة التى اتبعناها مخالفة تماماً لخطة العرض الاستقصائى العام الحالية من التفاصيل الفنية ، وخطة عرض مقرر فى العلوم العامة .

إن الطرق المدرسية فى التعليم ، مضافة إلى مقدرة الطالب العام المحدودة على الاستيعاب ، هى من بين الصعوبات الجمة التى يصادفها مدرس الفيزياء بالكليات . وإحدى هذه الصعوبات هى استخدام علم الرياضة ، الذى يجب أن يدخل فى أضيق الحدود ، فى التدريس ، لأن قليلا من الطلبة هم الذين تعلموا تعليما رياضياً ذا قيمة . ولا يستطيع مدرس الفيزياء أن يعرض مقرراً دون أن يستخدم الطرق الرياضية ، وإلا فسدت طريقته وبطل منطقه . وقد جابهنا هذا الموضوع باستخدام الجبر والهندسة فقط ، فى الاشتقاقات والبراهين ، مهملين تدوين الخطوات إذا كان من السهل تتبعها . ولم نحجم عن استخدام رياضة أعلى من المعتاد بالنسبة للمتداول المعروف كلما دعا الأمر إلى بناء منطقى سليم ، ولم نترك إلا القليل من النتائج بدون برهان . ولكننا قد بذلنا محاولات حقة لجعل التفكير الرياضى يقودنا من المبادئ الأولية العامة إلى التجربة وتطبيقاتها .

ونظرة إلى محتويات الكتاب تبين سريعاً القطاع « الرأسى » لخطة العمل ، ما امتد من أجزائها وماحذف. وباختصار ، فإن الموضوعات التى يحتويها هى ديناميكا الجسيمات والديناميكا الكهربية ، والظواهر الذرية والنووية . وقد أسست ديناميكا الجسيمات على قوانين « نيوتن » للحركة ، وحذفنا كلية ديناميكة الجسم المتماسك وديناميكة الموائع ، والآلات . ولكننا فى الوقت نفسه عالجنا قوانين البقاء باستفاضة لا بأس بها ، وأدخلنا فى نهاية الجزء الأول فكرة « الذرية » تمهيداً لتطبيق القواعد الديناميكية على الذرات خلال نظرية الحركة للغازات . وفيما يختص بالديناميكا الكهربية ، بنينا أغلب دراستها أيضاً على فكرة الذرية الممهد لها من قبل ، وكان هذا على حساب نظرية الدوائر والآلات الكهربية التى وضعت فى أضيق الحدود . أما فى قسم الفيزياء الذرية فقد عالجنا الظواهر الذرية ميكانيكياً على الأساسين الكلاسيكى والكمى . وأشرنا بصفة خاصة إلى انتشار الضوء وما لابسه من اختلاف

وجهتى النظر ، وأسهبنا بعض الشىء فى النظرية النسبية الخاصة . أما فى القسم الأخير . وهو الخاص بالفيزياء النووية ، فقد ركزنا على الدور الذى لعبته معادلة أينشتين لعلاقة (الكتلة والطاقة) فى التفاعلات النووية . وأنهينا الكتاب بالباب الأخير ، وهو المتعلق بوصف فيزياء النيوترون والانشطار النووى .

إن المقرر الذى تتضمنه مادة هذا الكتاب يستوعب فصلا دراسيًّا ، أو فصلين دراسيين حسب عدد المحاضرات الأسبوعية ، ومدى القراءة الخارجية ، وما يوكل إلى الطالب من مسائل عليه حلها . وقد درس لطلبة جامعة « ييل » المبتدئين للمرة الثامنة (حتى سنة ١٩٥٠) على هيئة فصل دراسى واحد يستغرق ثلاث محاضرات مهيأة بالتجارب التوضيحية بالإضافة إلى جلسة مناقشة (قاعة بحث) وفترة عملية — كل هذا أسبوعيًّا . وفيما يختص بالتجارب التى يجريها الطالب أو التجارب التى يقوم بها المحاضر للتوضيح ، فهذه قد هيئت بحيث تتمشى مع مادة المحاضرات على قدر الإمكان . أما فصول المناقشة والدروس العملية ، فهذه يقودها المدرس نفسه أو المشرف ولا يزيد عدد الفصل فيها عن ٣٠ طالباً . ولقد صادف هذا المقرر استجابة من الطلبة ومن المشرفين عليهم ، مما يشجع ويدعو إلى الاعتقاد ، بأن طريقة العرض التى اتبعناها وما صاحبها من خطة قد جعلت دراسة العلوم لطلبة الآداب من الأمور المستساغة المملوءة بالمعانى والفوائد .

إن مقرراً محدد المعالم كثير التنوع فى مواده ، مثل هذا المقرر ، من الطبيعى أن يثير بعض المسائل الجدلية بين القائمين على تنفيذه . وقد تغلبنا على كثير من الصعوبات ، فور نشوئها فى وقتها ، وقضينا على عوامل التردد بمعاونة كثير من المساعدين الذين قدموا حلولا عملية . لهؤلاء نقدم شكرنا وامتناننا الذى نعبر عنه أيضاً للنابهين من الطلاب الذين تتلمذوا على أيديهم وتعاونوا معهم بروح الزمالة فى إنجاح هذا المقرر الجديد . ونحن نأمل بأن يزداد الوعى بين غيرهم من المساعدين والطلاب للتحقق من أن وسيلة اقترابنا لتدريس الفيزياء بالطريقة التى اتبعناها ناجحة ومؤدية للغرض .

فبراير سنة ١٩٥٠ — المؤلفان

الجزء الأول

ديناميكا الجسيمات

الفصل الأول

طبيعة الفيزياء

١ – ١ دراسة العلوم :

يربط تاريخ العلم بين نتائج كثيرة متراكمة من أنواع المعرفة المتعلقة بالعالم الطبيعى ، وهو فى هذا يشبه ، إلى حد كبير ، علم تاريخ الحضارة الذى يعنى بالآثار الثابتة لما أوجده الإنسان . ولا يغيب عن الخاطر أن نمو المعرفة العلمية يتفتح يوماً بعد يوم فى تسلسل تاريخى ، ولكل اكتشاف وكل تطور مكانه الزمنى ، ويرجع أكثر الفضل فى بروز أهميته ، إن لم يكن فى نشوئه كلية ، إلى ما سبقه من اكتشافات . وفى هذا النمو التاريخى توجد ، بطبيعة الحال ، فترات نشاط زائد تتوالى فيها الاكتشافات وتستغل إلى أقصى حد ، كما توجد فترات خمول نسبى أمضاها العالم فى تنظيم ما جناه من مكاسب . وبهذا المعنى يمكن اعتبار العلم المحاولة الدائبة المتكاملة من الإنسان لفهم طبيعة العالم .

وهناك وجهة نظر أخرى ننظر بها إلى بناء المعرفة العلمية . (شأنها شأن تاريخ الحضارة) . فهناك الناحية الفلسفية أو المنطقية للعلم ، وهذه مستقلة تماماً عن نطاق الكشف عن الحقائق وتسلسلها . فكل اكتشاف جديد يضيف صفحة إلى تاريخ العلم ، ولكنه علاوة على ذلك يزيد لبنة إلى الهيكل المنطقى الذى تتألف منه معلوماتنا المتكاملة عن الطبيعة . وهذا الهيكل هو ما يطلق عليه أحياناً اسم العلم ، أما جهود العلماء اليومية والنظرة التاريخية لمكتشفاتهم ، فإنها تذهب فى طى الإهمال ، والواقع أن هذه الجهود المستمرة فى إقامة الهيكل وتشييده هى التى تكون العمود الفقرى لما يطلقون عليه كثيراً اسم الطريقة العلمية . وليس الغرض من هذا الكتاب هو إبراز هذه الطريقة العلمية ، إذ أن هناك طرقاً كثيرة لجمع المعرفة ، ولكن ليست هناك قواعد يمكن اتباعها فى تطوير هذه المعرفة . وهناك بالطبع اتجاه عقلى

غير مقيد بأية آراء سابقة ينص على المشاهدة الدقيقة ، وتحقيق ما يوضع من فروض . والغرض من هذا الكتاب . . هو إبراز قوة الفكر العلمى المستخلص من تجارب دقيقة أجريت فى إحدى نواحى العلم وهى الناحية المختصة بفيزياء الذرة وما لها من تركيب داخلى . والمأمول أن يزداد بهذا وعى القارئ واحترامه للفكر المنظم .

وليس من المسلم به أن يكون التفكير العلمى الوسيلة الوحيدة التى ينمى بها الإنسان فلسفته فى الحياة ، فمن المشكوك فيه قطعاً ، أنه إذا استخدمت الطرق العلمية فى أعمال شكسبير ، أنها تكون ذات أثر فى تحسين دراماته . أضف إلى هذا أن العلم لا يعتمد اعتماداً كلياً على التأمل المنطقى ، وسوف نرى أثناء دراستنا لتركيب الذرة أن شيئاً يشبه الوحى يلعب دوراً هاماً فى العلم . وفى تقدم الفيزياء أمثلة تدل على الحدس أو التخمين الناجح . ويجب أن نلفت النظر إلى أن هذه الانبثاقات الإلهامية تنجح غالباً ، لأنها صادرة عن عقول مدربة على التفكير المنطقى . إن التدريب الذهنى المنطقى هو جزء هام مثمر من نتائج تعليم العقول الذكية ، وسوف يظهر لنا جلياً اليقين بصحة هذا الرأى فيما نعرضه على هذه الصفحات من مادة . وإذا ظهر أثناء عرض هذه الطريقة أن الطالب قد نفذ ببصره إلى بعض الحقائق عما يحيط به من مادة فى العالم الخارجى ، فإنه يكون قد حصد حصداً مضاعفاً لما بذله من جهد .

جرت العادة على تقسيم دراسة الفيزياء إلى ميكانيكا وحرارة وصوت وكهربا ومغنطيسية وضوء ، وهذه الفروع التى كانت بمثابة غرف محكمة الإغلاق تقريباً فى أوائل هذا القرن قد ابتدأ استقلالها ينهار ، وأصبحت تعتمد فى وجودها على ما حققته الفيزياء الذرية والنووية من نشاط وثراء . لذا نجد أنفسنا ، ونحن منقادون فى رغبتنا إلى إبراز اتجاه الفكر الفيزيائى الحديث ، أن نتلمس فكرة موحدة صالحة للبناء عليها ، أكثر من مجرد الإحاطة بكل جزء منها بمفرده . إن ما نفقده فى هذه الطريقة نظير عدم الإلمام الكامل بوحدات المعرفة الحالية نكسبه فى القوة والروعة والبعد عن معالجة الموضوعات بطرق العزل القديمة . ويبدو لنا فى هذا المجال

أن الطبيعة الذرية والجسيمية للمادة هى أكثر الأفكار ربطاً وسعة انتشار فى العلم الحديث ، وأن الاقتراب بفكرة الدقائق أو الجسيمات ليس مفيداً فى فحص نتائج البحث الحديث فحسب بل أيضاً فى توضيح التركيب البنائى المنطقى لعلم الفيزياء.

إن فكرة استخدام الذرة أو الجسيم فى علم الفيزياء ليست جديدة على الإطلاق ، ولكنها أخذت شكلها الحالى قبيل بداية القرن الحالى الذى يعتبر تاريخاً لابتداء نموها الحديث . وقد كانت ، بحق ، إحدى الأفكار الناجحة جداً التى أدخلت على هذا العلم ، فلا غرابة فى تحكمها وسيطرتها على الفكر الفيزيائى الحديث . والذرة فكرة محددة ولكن تركيبها يلازمه الغموض ، لأنه لا يمكن إدراك جسيمات أو دقائق العلم الحديث بالحس المباشر ، ولا يمكن الإلمام بصفاتها إلا بعد تجارب متنوعة كثيرة ، ولكل جسم خصائص كثيرة مستنبطة . فالإلكترون وحدة ميكانيكية كهربية ضوئية معقدة التركيب ، ولكنه مماثل من كل الوجوه لكل إلكترون فى بلايين بلايين الجزئيات فى كل جرام من المادة فى الكون .

وباختيارنا فيزياء الجسيمات أو الدقائق موضوعاً لدراستنا ، فإننا لا نغمط النواحى الأخرى الأكثر أهمية حقها ، وهذه النواحى هى المتعلقة بالدراسات الأساسية فى الميكانيكا والكهربا والضوء ، إذ الواقع أننا نحتاج إلى نتائجها وطرقها فى فهم طبيعة الذرة والجسيمات الأساسية الأخرى المرتبطة بها ، ولا نعدو الواقع ، إذا ذكرنا أن القوانين المألوفة لهذه الدراسات الأساسية هى التى مهدت الطرق لاكتشاف الفيزياء الحديثة ووصف دقائقها أى جسيماتها . وهذه الدقائق هى التى بدورها تسبغ فهماً حقيقياً على تركيب المادة ، وعلى طبيعة وسلوك كل من الكهربا والحرارة وأصول الضوء ، بل وعلى الدراسات الأخرى التى جرى العرف على إدماجها فى علم الفيزياء .

١ ــ ٢ أسس الإجراء العلمى :

ولو أنه لا يوجد سلوك معين ثابت فى الأعمال العلمية ، وبعبارة أخرى لا يوجد كتاب مقدس يتبع الإنسان تعاليمه حرفياً ، إلا أن هناك مبادئ أساسية للإجراءات

المتبعة فى دراسة العالم الفيزيائى . وهذه يمكن التعرف عليها ولو بطريقة أولية تحت الموضوعات الآتية :

المشاهدة .

القياس .

التجربة .

العلاقات والقوانين .

النظريات .

وليس المقصود من هذا أن المشتغل بالعلم يستخدم هذه الموضوعات كقائمة حساب يعرف بها مقدار تقدمه فى بحثه ، لأنه غالباً ما يكون مشغولا مشغولية تامة بطور بسيط من أطوار نمو موضوع يحجب عنه فى الوقت نفسه اهتمامه بالأطوار الأخرى المكملة للصورة . ونحن فى هذا الكتاب معنيون بالطرق المنطقية التى نصادفها فى الفيزياء الذرية ، ومن المناسب ، بل من المطلوب فهم شواهد طرق الإجراء العلمى ووضعها نصب أعيننا .

وقبل أن نصف فى إسهاب المبادئ الأساسية لتلك الإجراءات العلمية المذكورة نجد من المناسب الإشارة إلى النواحى ، التى لا يمكن استخدامها فيها . فهناك مقومات معينة لازمة للعالم فى دراسته للكون وتتطلب بطبيعتها أن يترك جانباً بعض الأمور على أنها خارج نطاق العلم . ومن هذه المقومات وجود ظواهر علمية فى العالم الخارجى الواقعى تكون قابلة للمشاهدة والقياس . بهذا التحديد يخرج جزء كبير من التجارب الإنسانية من حدود النشاط العلمى ، كما نعرفه اليوم ، كما يخرج من نطاق العلم بعض التجارب الذاتية ذات الطابع الشخصى . وقد يشهد المستقبل تقليل الحظر على بعضها واتساع حدود العلم بحيث تشمل نواح جديدة من التجارب . ولقد حدث هذا فى الماضى على سبيل المثال فى علم النفس . ولذا ليس من الخير اتباع فلسفة مقيدة للعلم .

١ – ٣ المشاهدة :

تختص العلوم الطبيعية كما يدل عليها اسمها بظواهر الطبيعة . إن مشاهدة هذه الظواهر يشترك فيها جميع الناس على السواء ، وتكون فى مجموعها ما يسمى بالتجربة الموضوعية . ووضع حد فاصل بين العالم الموضوعى والعالم الذاتى ، قد يكون من المسائل الصعبة فيما يسمى بالفلسفة البحتة ، ولكن من النادر أن يصادف المشتغل بالعلم مشكلة من هذا القبيل ، فمن المتفق عليه بصفة عامة أن حواسنا تحمل إلينا أعمال الدنيا المحيطة بنا ، وتسمى هذه المعلومات « مشاهدات » وهذه المشاهدات هى التى تسترعى النظر فى العلوم الطبيعية ، فلا الغرض النهائى من الوجود ولا السبب الأولى له من الموضوعات التى تشغل بال العالم. وبصيغة أخرى إن العلم مقصور على وصف الطبيعة خلال المشاهدات . أما المسائل التى لا يمكن إخضاعها لمظاهر قابلة للمشاهدة فهى تخرج عن حدوده مهما كانت شائقة أو أساسية .

على أساس هذا التعريف يمكن اعتبار المشاهدة حادثاً تحمله إلينا حواسنا ، وقد تكون المشاهدة خاضعة للإدراك الحسى المباشر ، كما قد تحتاج إلى جهاز أو حرفة من حرف الكشف كعامل وسيط ، والوسيلة الأخيرة أكثر انتشاراً ورواجاً فى علم الطبيعة الحديث . وقد ساعدت التحسينات العظيمة التى أدخلت على الأجهزة العلمية ، على اتساع نطاق الملاحظة ، بل ضاعفتها مرات كثيرة ، فالمنظار الحديث يمكننا من رؤية آلاف النجوم الخافتة التى لا ترى بالنظر المباشر بل ومن تصويرها . ونحن لا نميز أساساً بين المشاهدة المباشرة والمشاهدة عن طريق وسيط ، ومعنى ذلك أن وضع جهاز فى الطريق لا يؤثر على حقيقة المشاهدة .

عند ما كان العلم يحبو ، وقبل عصر الأجهزة والوسائل العلمية ، كانت المشاهدات ترى وتسمع مباشرة ، ولاشك أن حركة الأجسام وتشكيلات النجوم وأوضاع الأجسام الأرضية قد شغلت ذهن المشتغل القديم بالعلم وجعلته ، من باب الروح العلمية ، يصنف تجاربه ويعمم منها ما أمكن تعميمه ، ولا بد أن

يكون قد اتضح له من عمليتى التصنيف والتعميم منذ فجر التاريخ أن هناك علاقات بين مجموعة المشاهدات .

١ ـ ٤ القياس :

ربما كانت أبسط علاقة فى الدنيا هى العلاقة الوصفية بين المشاهدات . فالماء من تلقاء ذاته يجرى لمستقر له نحو مركز الأرض ، ومعظم الأجسام التى تفلت من يدنا تسقط ، والشمس تشرق ثم تغرب يوميًّا ، وهناك علاقة بين اضطراب الأمواج اللاسلكية ونشاط بقع الشمس . مثل هذه العلاقات بين المشاهدات أمر معروف ومقبول وشائع لدرجة يصعب معها اعتبارها جزءاً من العلم . إن المجهودات العلمية العالية تسمو فوق مجرد تدوين أوصاف الحوادث واتجاهاتها ، إذ لابد أن تخضع المشاهدات للقياس ، وأن تكون هناك أرقام تدل على حجمها ومقدارها .

ومن المستبعد تصور أن طبيعة هذه القياسات بعيدة عن ذهن القارئ . فنحن نستخدم وحدة للقياس لتدل على مقدار عدد مرات احتواء المشاهدة عليها . وهذه الوحدة فى قياس الأطوال عبارة عن قدم أو مسطرة طولها قدم أو قضيب طوله متر نتخذها كمعيار ، ونعبر عن المسافات بين النقط كأطوال بالقدم أو بالمتر ، وتتلخص عملية القياس فى قسمة المسافة إلى هذه الوحدات الأولية . وكثيراً ما يكون موضع التساؤل : هل العدد الذى نحصل عليه يكون فى الواقع طولا أو وصفاً لخاصية أكثر عمقاً ؟ وجواب الفيزيائى على ذلك هو أن فكرة الطول متصلة اتصالا وثيقاً بعملية قياسها ، حتى إنه لا يمكن إعطاؤها معنى فيزيائيًّا مستقلا عن عملية تحديد هذا الطول . أى أن الطول فى علم الفيزياء ـ ويخضع لهذا تعريف جميع المشاهدات ـ لم يخرج عن كونه وصفاً للعمليات المستخدمة للحصول على رقم القياس . وبطبيعة الحال عند ما تكون عمليات القياس مفهومة ومتفقا عليها فإنه يمكن حذفها من المناقشة ، شأنها فى ذلك شأن معانى جميع الكلمات فى الجمل ، فهى لا تكتب فى الهوامش .

ولطريقة القياس وجهان : أولهما اختيار الوحدة أو المعيار الخاص بنوع المشاهدة ، ثم استخدام طريقة فيزيائية لتعيين عدد يمثل عدد الوحدات التى تشملها المشاهدة . ومن الواضح أن ذكر الرقم وحده دون إلحاقه بوحدة لا معنى له كتقرير عن المشاهدة ، فهو لا يخرج عن كونه مجرد رمز للعدد . وعلى ذلك فنحن نتخذ كل وسيلة ، سواء فى ميدان العلوم أو ميدان التجارة لنتأكد أن القياس الذى أجريناه هو عيارى بالمعنى الصحيح . لا يتغير مع الزمن أو مع تغيير أماكن القياس أو البيع ، وهذا هو العمل الأساسى للمركز القومى للمعايير فى أى بلد من البلاد .

وحيث إن قياس كل نوع من أنواع المشاهدات قد يحتاج إلى وحدة خاصة به ، فلابد أنه يوجد فى علم الفيزياء ، عدد كبير من هذه الوحدات ، وقد يظن لأول وهلة أن تدوين هذه الوحدات وتبويبها عمل كبير لا ينتهى . ولكن من حسن الحظ أن العلاقات المضبوطة التى تربط بين المشاهدات ترتبط بها الوحدات كذلك ، ومما يسهل الأمر أنه يمكن اختيار كميات قليلة فى علم الفيزياء نطلق عليها اسم المشاهدات الأساسية ، يوضع لكل منها وحدة بصفة اختيارية محضة ! ومن هذه الوحدات القليلة يمكن بناء الوحدات الأخرى اللازمة للمشاهدات الأخرى . فالوحدات التى نحصل عليها بهذه الطريقة تكون نسجاً دقيق الغزل ، كل وحداته ، ما عدا القليل ، وحدات ثانوية أو مشتقة ، ويستغنى بهذه الكيفية عن إيجاد وحدة أولية فيزيائية لكل مشاهدة .

ومما يجب التنويه به أن الاتفاق على العمليات الأساسية نفسها وبالتالى على وحداتها الأولية عملية اختيارية محضة . ويرتكز الاختيار فى علم الفيزياء على قواعد بعضها تاريخى وبعضها فلسفى وبعضها عابر . ولقد استقر الرأى على أن تكون المشاهدات الأساسية هى الطول والكتلة والزمن .

أما وقد استقر الأمر على هذه المشاهدات الأساسية الثلاث فعلينا أن نختار الوحدات الممكن استخدامها فى عمليات القياس الخاصة بها . من الواضح أنه يمكن قياس الطول بالبوصة أو القدم أو الميل أو السنتيمتر إلخ . . وسوف يحظى اهتمامنا بمجموعة الوحدات المتصلة بالقياس الأساسى فى النظام المترى .

والوحدات الأساسية فى هذا النظام قد وضعتها مجموعة من العلماء منذ عهد الثورة الفرنسية . وفيما يلى وحدات المشاهدات الأساسية فى النظام المترى كما هى الآن :

الطول — السنتيمتر (سم)

الكتلة — الجرام (جم)

الزمن — الثانية (ث)

ويطلق عادة على هذا النظام اسم نظام سنتيمتر . جرام . ثانية . أو س . جـ . ث اختصاراً . ومن مزايا هذا النظام وجود علاقات عشرية بين الوحدة الأساسية ووحدات أخرى لنفس المشاهدة . ولهذه العلاقات أسماء مختصرة تلحق باسم الوحدة وهى :

ميجا	١٠٠٠,٠٠٠	($١٠^{٦}$)
كيلو	١,٠٠٠	($١٠^{٣}$)
ديسى	$\frac{١}{١٠}$	($١٠^{-١}$)
سنتى	$\frac{١}{١٠٠}$	($١٠^{-٢}$)
ميللى	$\frac{١}{١٠٠٠}$	($١٠^{-٣}$)
ميكرو	$\frac{١}{١٠٠٠٠٠٠}$	($١٠^{-٦}$)

فالكيلوجرام مثلا ١٠٠٠ جم والميكروجرام واحد على مليون من الجرام ، والميللى ثانية واحد على ألف من الثانية وهكذا . ولهذه الوحدات علاقات سهلة واضحة بالوحدة الأولية أو الوحدة الأم فى نظام س . جـ . ث .

هذه الميزة ليست موجودة فى الوحدات المستخدمة فى النظام الإنجليزى الشائع الاستعمال فى كل من أمريكا وإنجلترا . حيث إن الباوند (الرطل) فى هذا النظام ١٦ أونساً (أوقية) والميل ٥٢٨٠ قدماً . ولو أن نظام س . جـ . ث . سوف يكون النظام السائد فى هذا الكتاب ، إلا أنه من المفيد تسجيل العلاقات الآتية المقربة بين وحدات النظام المترى ، وأشهر الوحدات المستخدمة فى النظام الإنجليزى .

البوصة = ٢,٥٤ سنتيمتراً

الميل = ١,٦١ كيلومتراً

الباوند = ٤٥٤ جراماً

٢,٢٠ باوند = ١ كيلوجرام

١,١٠ كوارت = ١٠٠٠ سم^3 = اللتر

ومن الضرورى أن نمد نظام س . ج . ث . بقدود أو نماذج فيزيائية . فهناك قضيب مصنوع من سبيكة من البلاتين والإيريديوم محفوظ فى مكان درجة حرارته ثابتة فى « سيفر » من أعمال فرنسا ، والمسافة بين خدشين على هذا القضيب تعين المتر العيارى . وكما يدل اسمه يعتبر السنتيمتر واحداً على مائة من هذا الطول . وبالمثل توجد فى المكان نفسه أسطوانة مصنوعة من السبيكة نفسها ، اتفق على أن تكون كتلتها ١٠٠٠ جم (الكيلوجرام) . وتعرف الثانية من الزمن بأنها $\frac{١}{٨٦٤٠٠}$ من متوسط اليوم الشمسى (ومتوسط اليوم الشمسى هو متوسط اليوم فى مدة عام من الزمن الذى تستغرقه الأرض فى عمل دورة واحدة حول محورها) . وفى المركز القومى للمعايير بالولايات المتحدة (وبالجمهورية العربية المتحدة وغيرها) قضيب مترى مماثل وأسطوانة كيلوجرامية مماثلة للموجود المقابل لهما فى فرنسا ، والمقارنة بينهما معروفة ومسجلة بدقة .

يبقى أخيراً تعيين المقصود بوحدات س . ج . ث . خلاف وحدات الكتلة ، والطول والزمن . قد أجملنا فيما سبق الإجابة عن هذا السؤال فذكرنا أن العلاقة التى تربط المشاهدات هى العلاقة نفسها التى تربط وحداتها . فمثلا السرعة حسب التعريف هى كمية نحصل عليها بإيجاد النسبة بين الإزاحة (وهى المسافة المقطوعة) والزمن اللازم لإتمام هذه الإزاحة أو

$$\text{السرعة} = \frac{\text{الإزاحة}}{\text{الزمن}}$$

لذا فإننا نحصل على وحدات س . ج . ث . للسرعة بتدوين وحدات س . ج . ث . للمشاهدات المستخدمة فى تعيين السرعة وهى الطول والزمن . إذن

لابد أن تكون وحدتها سنتيمتراً لكل ثانية أو سنتيمتراً فى الثانية ، والتسمية الأخيرة من نوع الاختصار الدارج. والحقيقة أنها سنتيمتر على ثانية، وبالرموز (سم/ث). وبالمثل فإن وحدة س . ج . ث . للحجم هى السنتيمتر المكعب (سم^{٣}) وللمساحة (سم^{٢}) وهكذا . . .

وميزة التمسك بنظام معين مثل نظام س . ج . ث . ترجع إلى قدرتنا على اشتقاق وحدات أخرى منها (ولو أن هذه الميزة موجودة فى النظم الأخرى كذلك) . وبصرف النظر عن الإجراءات الحسابية المتخذة فى هذا النظام (مثل الأس الموجب والسالب) ، وعن الكيفية التى يمكن التعبير بها عن هذه المشاهدات مع الاحتفاظ بمقاديرها مقيسة بوحدات س . ج . ث . ، فإن هذا النظام باق للنهاية ، إذ فى استخدامه ضمان لوضع الوحدة السليمة لأية كمية نصادفها فى أية علاقات معقدة بين المشاهدات ، وهذا ما سوف نبرزه غالباً فى عمليات كثيرة فى هذا الكتاب .

١ ــ ٥ التجربة :

لم نصف إلى الآن طريقة معينة لجمع المشاهدات والقياسات ، ولكن ذكرنا أن مشاهدة العالم الخارجى شائعة بين جميع الناس . وبدون أن يبذل الإنسان أى جهد ، فإن كثيراً من الظواهر الطبيعية معروض أمامنا للملاحظة . والحقيقة أن هذه الظواهر تلفت النظر وتبعث على الحيرة علاوة على فائدتها للعلم . وفى علم الفيزياء ، كما فى كثير من العلوم الأخرى ، تجمع المشاهدات بشكل تحررى وبكيفية تساعد على البناء المنطقى للعلم . وعملية جمع المعلومات تسمى التجربة أو الطريقة التجريبية ، وقد اكتسبت هذه الطريقة الثقة والسمعة بأنها أداة البحث العلمى . وهى فى أصلها بسيطة للغاية تتلخص أصولها فى فصل نظام فيزيائى أو ميكانيكى عما يحيط به من التأثيرات الخارجية ، التى يكون بعضها معلوماً وبعضها يشك فى وجوده ، ثم يغير الإنسان ، حسب الإرادة ، إحدى المشاهدات أو بعضا منها فى هذا النظام ، ويقيس أى عملية تنتج عن هذا الإجراء . وتكمن قوة هذه الطريقة فى أن العمليات الناتجة يتبين ارتباطها بالمشاهدات التى عدلتها التجربة

أو الباحث ، ومن هنا ينشأ الانتباه بأن ثمة علاقة فيزيائية لابد وأن توجد ، . والأكثر من هذا أن الشكل الرياضى ، الذى تأخذه هذه العلاقة ، يمكن الوصول إليه بطريقة وضعية بتغيير ظروف التجربة بكيفية منظمة وملاحظة النتيجة : وعند ما نتبع هذا الإجراء بعناية يكون تحت يدنا أداة فعالة مقنعة لكشف مغاليق الطبيعة . مثلا قد نرغب فى معرفة العلاقة بين ضغط الغاز وحجمه . لفصل الغاز لابد من حصره فى محتوى يمكن قياس حجمه . ولعزل التأثيرات الخارجية ، لابد أن نتأكد من أن الإناء لا يتسرب منه الغاز ، وأن مادته من نوع لا يتفاعل كيمويا مع الغاز المحصور ، وأن درجة حرارة الغاز تظل ثابتة ، وأن التركيب الجزيئى للغاز لا يتغير أثناء التجربة وهكذا . والمأمول بعد هذا أن نتمكن من معرفة العلاقة بين ضغط الغاز وحجمه بتغيير ضغط الغاز بطريقة منتظمة ، ومشاهدة الحجم فى كل حالة (قانون بويل) .

ولابد فى هذا المقام ، من ذكر كلمة أو أكثر ، لنمسك بعنان الفكر خوفاً من أن يظن القارئ ، بأنه ما عليه إلا أن يدير بجميع الأيدى الممكن إدارتها فى الطبيعة ، وتركيز انتباهه حتى تتفتح أمامه طرق المعرفة فيرى آفاقاً جديدة من البحث . أولا وقبل كل شيء لابد من إجراء التجربة بدقة وكفاية حتى يمكن أن تكون مفيدة ، ثم إنه لابد أن نهيء علاقة سببية محتملة بين المؤثر والنتيجة . وهذا نوع من الإجراء الفنى والتدريب فى تصميم النظام الفيزيائى — وهو جهاز البحث — واستخدامه . ولابد أن يدقق الباحث ويصبر ويتعلم أن يشك بعض الشيء . فالباحث يجرى التجربة وهو متحكم فيها ويجتهد فى إعادة المشاهدات ومراجعة العوامل الخارجية المؤثرة عند كل طور ، وبديهى أن هذه الإجراءات تستغرق وقتاً ، وكثيراً ما يبدأ الإنسان بدءاً غير سليم ، كما أنه كثيراً ما تصادفه صعوبات غير منتظرة عليه أن يصبر ليحلها إذا أراد التقدم فى التجربة .

وهناك أمر أكثر خطورة يحتاج إلى حل فى الإجراء التجريبى ، وهذا الأمر يتعلق بتعيين التجربة المناسبة الواجب إجراؤها ، إذ أن معظم التجارب ، إن لم

يكن جميعها تقريباً ، إما عديمة الجدوى وإما قليلة الأهمية فى إمدادنا بمعرفة أساسية جديدة . وكثيراً ما يتطلب الأمر ترك حدود التعقل المنطقى الآمنة واستلهام فكر نفاذ أو إيحاء من نوع خاص قد يكون موجوداً فى بعض الرجال أو بعض الأجيال ، ولكنه معدوم تقريباً فى آخرين . وكغيرها من فنون الحذق والمهارة ، تأخذ التجربة فى يد أهل النبوغ صفة النفاذ العميق إلى أصول المعرفة ، وقد يستدعى الأمر استخدام خيال فياض للوصول إلى آراء جديدة وطرق مبتكرة للبحث . وإلى هنا ليس لدينا ما نستطيع إضافته فى هذا الشأن .

كثيراً ما نسمع أن الطريقة التجريبية قد ولدت فى عصر النهضة الأوربية على يد رجال عظماء مثل جاليليو . ولكن من الصعب التحقق الفعلى من هذا الأمر ، إذ أن الرجال الموهوبين قد ولدوا فى كل عصر من العصور السابقة لحضارتنا . حقيقة قد صاحب عصر النهضة حالة صحو وتيقظ فى العلم نتيجة لأعمال الأفذاذ من الرجال الذين دأبوا على تجاربهم العلمية . ولكن التجارب العلمية نفسها لم تكن اختراعاً جديداً ، وإنما الجديد فى الأمر هو الاستغلال الصحيح للاختيار الناجح لنوع التجربة . فقد لجأ الإنسان إلى التجارب ، أحياناً باستخدام طرق لا بأس بها من الدقة ، منذ فجر التاريخ . ولكن ما لم يعمله هو تمسكه بالتجارب التى تصل مباشرة إلى لب الموضوع ، شأن التجارب التى عملها « جاليليو » ، فكنته من وضع يده على مغاليق حركة الأجسام ، فبدأ من وقتها تقدم مستمر أدى فى النهاية إلى ما يعرف بعلم الفيزياء الحديث .

ولو أن التجربة عنصر أساسى من عناصر الفيزياء ، إلا أنها فى حد ذاتها غير قادرة إلا على تقدم محدود فى إرساء قواعد البناء المنطقى للعلم . ولكن ترجمة التجارب وتوحيد نتائج مجموعة منها بالإضافة إلى التجارب نفسها هو الأساس ، وسوف ننتهز هذه الفرصة وننظر إلى هذه الناحية الهامة من التعقل العلمى .

١ ـ ٦ قوانين الفيزياء ومقابلة النتائج :

إن إقامة وتنظيم هيكل كبير من الخبرات الطبيعية قد وصل إلى درجة عالية

من الصياغة فى علم الفيزياء . إن الصياغة هى لغة الرياضة وطريقها . وقد أمكن الاستفادة من دقة هذا النظام فى تقريب المشاهدات وتوحيد نتائجها . إن عظمة الرياضة وفخامتها تكمن فى قدرتها المطلقة على ربط المقدمات بالنتائج فى تسلسل منطقى . وهى من بين جميع طرائق المنطق أكثرها دقة . وطريقة استخدامها فى الفيزياء تتلخص فى وضع رموز رياضية تتعلق بالمشاهدات والتعبير عن العلاقات بينها بصيغة رياضية وربط هذه العلاقات بأخرى بوساطة قواعد خاصة ، ومحاولة اختزالها كلها إلى صيغة قابلة للفهم .

وأبسط طرق استعمال الرياضة فى الفيزياء هو استخدامها فى صياغة قوانين الفيزياء . وهذه القوانين عبارة عن إقرارات أو صيغ مدونة بين المشاهدات المختلفة فى أى نظام فيزيائى معين ، أى أنها علاقات بين مجموعات القياس . وفى اشتقاق أى قانون فيزيائى يجب الاستقرار على القياسات المطلوبة وتحديد صيغة القانون ، وفى الغالب يجب ذكر شىء عن طبيعة النظام الفيزيائى الموجود . وعما إذا كان يوجد ما يحد من عمومية القانون . فمثلا فى حالة الأجسام الساقطة إلى الأرض ، يرتبط الزمن ى الذى يمضى من لحظة انطلاق الجسم بالمسافة ف المقطوعة فى هذا الزمن بالمعادلة الجبرية الآتية :

ف = ثابت × ى^٢

لعدد كبير من الأجسام الساقطة . حقيقة أن البالونات المملوءة بالأيدروجين لا تتبع هذه الصيغة ، وفى الواقع تدل القياسات المأخوذة على جميع الأجسام أن القانون تقريبى ، ويكاد ينطبق انطباقاً تامًّا فى حالة الأجسام الساقطة فى الفراغ ، وانطباقاً لا بأس به فى حالة الأجسام الساقطة فى أوساطنا إذا كانت الأجسام ثقيلة وتشغل حيزاً صغيراً ما لم يكن الزمن المستغرق طويلا جدًّا . هذه هى أنواع الوقائع التى تصف حدود القانون الفيزيائى ، وهى فى العادة غير دقيقة ، إذ تحتوى على كلمات مثل « تقريباً » ، « يكاد يكون » وهى موانع تحد من الدقة التى نصف بها الطبيعة . وهذه التقريبات موجودة ، فى صيغة أو فى أخرى ،

فى علم الفيزياء بصفة دائمة ، أى أن العلاقات الرياضية المضبوطة تحتوى على كميات فيزيائية مقيسة إلى دقة محدودة .

وبعض قوانين الفيزياء يمكن الوصول إليها بمحاولة إيجاد العلاقات العددية بين مجموعة المشاهدات . فإذا ما أمكن صياغة القانون تعمل محاولات لإيجاد منطقة نفوذه أو عمله . ومن الإجراءات المتبعة أن يغير شرط من الشروط التى كانت ثابتة فى المحاولة الأولى ويبحث عن النتيجة . وقد نجد من المناسب إدماج هذا فى القانون نفسه بأن تمثل القياسات الجديدة بوساطة رمز يدخل فى القانون ثم تغير شروط المتغيرات الأخرى بكميات متزايدة حتى « يختل » القانون ، وعندئذ تجرى تعديلات فى محاولة لترميمه أو إقامته من جديد ، ونستمر فى إجراء التعديلات على القانون حتى تنبسط منطقة نفوذه إلى أكبر رقعة ممكنة ، ويصبح من المستطاع تمييز نظام معين بقانون ذى صفة عامة كبيرة . وإذا كانت النتائج عامة بدرجة كافية ومفيدة ، فإنها تسترعى انتباه المشتغلين بالعلم وطلابه . وكثيراً ما يشفع القانون باسم يتوجه مثل قانون بويل لسلوك الغازات المحصورة .

ويعتبر هذا الإجراء الوضعى فى ابتكار القوانين الفيزيائية وصياغتها طريقاً مطروقاً شائعاً لزيادة رقعة العلم ، فهو ينتهى بنوع من سرد للمعادلات ، وأين ومتى تستخدم . حقيقة أنها خالية من القواعد الموحدة الموجودة فى فيزياء اليوم التى تستخدم وسائل أخرى فى كشف الطبيعة ، وابتكار التجارب المؤدية للغرض ، إلا أنها طريقة وضعية لا بأس بها تتم عن طريق المحاولات الدائبة المعدلة ، مفيدة فى الحصول على معلومات جديدة لا سيما فى أيدى من يجرى التجارب من الموهوبين النشطين .

١ — ٧ النظرية الفيزيائية :

أما الناحية الأخرى من نواحى البحث الفيزيائى فتهدف إلى استخدام الرياضة وتسمى « بالنظرية » . وليس من السهل وصف طبيعة هذه الطريقة كما وصفنا « التجربة » ، فطريق الفطرية ونتائجها أكثر تعلقاً بالذهن ، بمعنى أنها أقل التصاقاً بالمشاهدات التى من أجلها وجدت التنسيقها .

ويجب أن يكون مفهوماً من مبدأ الأمر أن النظريات فى علم الفيزياء ليست نوعاً من خلاصات التقطير للصيغ والقوانين المستنتجة وضعيًّا ، وإنما هى فى الواقع محاولات لتفسير القوانين بمجموعة من القواعد الذهنية الأساسية فى الطبيعة ولو أنها ليست غالباً من النوع الذى يسهل الوصول إليه بالملاحظة . وأحياناً يحتاج العالم النظرى إلى تحليل نتائج عدد كبير من التجارب لإيجاد وحدة صلة على شكل قاعدة عامة بينها . وأحياناً يفرض قواعد من عنده مستلهماً تشابهاً معيناً فى ذهنه أو ابتكاراً جديداً من عنده كى تصبح به النظرية كاملة ، وذلك قبل أن تكتمل لديه إلا أوهى المشاهدات . وأحياناً تنمو النظرية الجديدة من نظريات موجودة من قبل ويكون الغرض منها إمكان تطبيقها فى ظروف جديدة أكثر حفزاً على وضع قواعد جديدة .

تبدأ صياغة النظرية ببديهيات وفروض يقترحها المشتغل بالفيزياء النظرية على أنها قواعد أساسية فى الطبيعة . وقد تتعلق هذه القواعد بالمشاهدات مباشرة ، ولكنها غالباً ما تكون على شكل إقرارات عن آراء مصطنعة اصطناعاً توفق فيما بعد على المشاهدات . وفى أكثر الأحيان تكون هذه الفروض على شكل معادلات . وفى الخطوة التالية تجمع هذه الفروض وتنمى وتهذب بالطرق الرياضية حتى توجد علاقة تربطها بالمشاهدات الممكنة . وقد تكون النتيجة على شكل قانون معروف ينظر إليه تحت ضوء جديد . كما قد تكون علاقة جديدة لم تختبر بعد على هيئة تنبؤ . ومما يجب التنويه به أن التنبؤ بالعلاقات الجديدة التى تثبت صحتها بالتجربة فيما بعد هو عنوان النظرية الناجحة . والنظريات الهامة هى التى تحتضن مناطق كبيرة من العلم وتشتق منها علاقات كثيرة قابلة للمشاهدة ، كل هذا من مجموعة مقدمات بسيطة . فالديناميكا النيوتونية التى بدأت من ثلاث قواعد بسيطة وهى « قوانين الحركة » الثلاثة ، يمكن إنماؤها لتحتوى على جميع العمليات الديناميكية المعتادة . فسلوك جميع الأجسام المتحركة والساكنة ، فى أماكنها ومساراتها ، وسرعاتها ، وكل المشاهدات الديناميكية الخاصة بها مرتبطة فيما بينها داخل إطار نظرية نيوتن . ولا يمكن إدراك مدى اتساع وقوة النظرية إلا بدراسة مفصلة لتطبيقاتها .

ولكن من الواضح أن مقدماتها وظروفها ، لابد وأن تكون قريبة قرباً كبيراً من أسس السلوك الطبيعى .

نحن الآن فى وضع يسمح لنا بتأمل السؤال الشائق الخاص بالعلاقة الأساسية بين النظرية والوجود . فبينما نتائج النظرية قابلة للتحقيق بوساطة التجربة ، إلا أن المعنى الحقيقى للنظرية ووضعها فى الطبيعة قابل ومفتوح للمناقشة . إن الفائدة العظيمة لعلم الرياضة كأداة لصياغة الأفكار النظرية وإنتاج القوانين الفيزيائية ، قد أدت بالبعض إلى استنتاج أن الطبيعة تعمل أساساً بطرق رياضية محضة . وعلى الأقل يوجد من يجاهر بأن للطبيعة هيكلا منطقيًّا بدليل أن الرياضة — وهى طريقة منطقية — صالحة لوصف الوجود . أمام هذا الرأى يوجد رأى آخر يقول : بأن الرياضة نفسها مشتقة من تشابهات طبيعية ، اكتشفها علماء الرياضة الذين نشأوا وعاشوا فى عالم لمسوا فيه مدى سيطرة الرياضة حتى على أكثر الدراسات بعداً عن المادية ، ولذا فليس غريباً أن تكون القوانين الرياضية قابلة للتطبيق على الظواهر الطبيعية . إن المنطق الأساسى للرياضة مقيد بفكرتنا عن الحقيقة ، وبالتالى بتأثير الطبيعة علينا ، ولذا فإنا نتوقع انسجاماً بين الرياضة والطبيعة . وأى معالجة مفصلة لهذه الآراء سوف تكون بعيدة كل البعد عن احتياجاتنا فى هذا الكتاب ، فنحن نطرق الموضوعات فقط لنشير إلى التحدى الذى يصادفه المشتغلون بالفلسفة وهم يتطلعون إلى النظريات الفيزيائية الحديثة . وكلما كانت النظرية بحتة وعامة كان أساس هذا الرأى أقل وضوحاً ، لذا فإن المشتغلين بالفيزياء يكفيهم من النظرية قوتها ونجاحها عن جدارة .

تكلمنا عن نظريات الفيزياء ، ولم نتكلم عن نظرية موحدة لعلم الفيزياء الحديث ، وهذا لا يعنى أن هناك شكًّا فى أى النظريات هى التى تلزم استخدامها عند مجابهة مجموعة من الظروف — وإنما يتضح ، على الأحرى ، أن الظواهر المختلفة للطبيعة تحتاج إلى نظريات لا يوجد بينها عامل مشترك كبير غالباً . لا توجد نظرية موحدة للمادة ، وإنما هناك نظرية تتعلق بسلوكها الميكانيكى ، وأخرى تتعلق بسلوكها الكهربى ، وأخرى تتعلق بخواصها الضوئية ، وهكذا . وقد

يدخل فى نطاق معرفة القارئ ، أن نظرية مكسويل الكهربية المغنطيسية قد ربطت بين نظريات كهربية وضوئية وميكانيكية كثيرة سبق أن وضعها رواد العلم الأوائل . وأن نظرية النسبية لأينشتين قد جمعت بين نواح معينة من الكهربا والجاذبية وجعلت منهما وحدة كاملة ، وأن النظرية الكمية الحديثة (نظرية الكم) قد نسقت بين بعض الخواص الكهربية للمادة ، وإشعاع الضوء وامتصاصه . وكلما نمت الفيزياء احتضنت نظريات جديدة أكثر استيعاباً وأحلتها مكان القديم منها . ولكننا لا نزال بعيدين إلى الآن عن اعتناق نظرية موحدة عامة . ومن المسائل الصعبة الشائكة محاولة عملت فى عشرات السنين الأخيرة لابتكار نظرية موحدة للمجال تربط بين خواص الجاذبية والخواص الكهربية والديناميكية للمادة . وفى نطاق أقل طموحاً لا تزال أمامنا مهمة اكتشاف نظرية تفسر سلوك نواة الذرة وتركيبها ، لاسيا وأن إمكانياتها التكنولوجية تستغل حالياً فيما يسمى بالانشطار النووى . كل هذه وغيرها من المشروعات الأقل أهمية تجعل جعبة العالم النظرى مماوءة دائماً بالأعمال المنتظرة ، ونحن على كل حال متفائلون بأنه من الممكن حدوث تقدم جديد فى النظرية الفيزيائية فى عهد قريب .

تمارين

(المسائل الأولى مهيأة لإعطاء تدريب لمعالجة قوى العدد ١٠)

١ — عبر عما يأتى بقوى للعدد ١٠ :

(ا) ١٠٠٠ متر بالسنتيمترات ، (ب) ٢٠٠ ميكروجرام بالجرام ،

(حـ) ١٠ كيلوسيكل بالسيكل ، (د) ٠,٠١ مم بالسنتيمترات .

٢ — احسب المساحات الآتية بالسنتيمترات المربعة :

(ا) مربع طول ضلعه ٥ أمتار ؛ (ب) دائرة نصف قطرها ٠,٠١ مم ؛

(حـ) مستطيل ١٠ كم × ١٠٠ متر .

٣ ـ احسب حجم ما يأتى بالسنتيمترات المكعبة :

(ا) مكعب طول ضلعه ١ متر ؛

(ب) كرة ($ح = \frac{٤}{٣}$ ط $نق^{٣}$) نصف قطرها ٢ مم ؛

(جـ) كرة نصف قطرها ٣ أمتار .

٤ ـ أوجد قيمة :

(ا) $\sqrt{١٠^{٤}}$ ؛ (ب) $\sqrt{١٠^{-٦}}$

(جـ) $\sqrt{١٠^{٧}}$ ؛ (د) $\frac{١٠^{٣} \times ١٠^{-٦}}{١٠^{٤}}$

(هـ) $٩,١ \times ١٠^{-٢٨} \times (٣ \times ١٠^{١٠})^{٢}$

٥ ـ احسب وزنك بالكيلوجرام وطولك بالمتر . وما يقابلهما بالرطل والبوصة .

٦ ـ المسافة من نيوهافن إلى نيويورك ٧٥ ميلا . عبر عن هذه المسافة بالكيلومتر .

مراجع مقترحة للاطلاع

Dampier, Sir William, "A History of Science", New York, The Macmillan Co., 1946.

يعالج الباب العاشر النواحى الفلسفية والرياضية للعلوم .

Joad C.E.M., "Philosophical Aspects of Modern Science", London, George Allen and Unwin Ltd. 1943.

الأبواب ٨ — ١١ عن تقبل الحقائق . بها نقد عن التعليل العلمى والفلسفى .

Lindsay, R. B. and Margenan H. "Foundations of Physics", New York, John Wiley & Son, 1936.

الباب الأول به معالجة دقيقة للتكوين المنطقى لعلم الفيزياء .

Moulton, F.R. and Schiffers J.J. "The Autobiography of Science," New York, Doubleday Doran & Co., 1945.

مقتطفات من آراء روجر بيكون عن العلوم التجريبية .

Shapley, H., Wright, H., Rapport, S., "Reading in Physical Sciences". New York, Appleton-Century-Crofts, Inc., 1948.

ورد فى صفحة ٤٠١ عرض للطريقة العلمية فى الكيمياء .

الفصل الثانى

بعض قواعد الرياضة الخاصة بالفيزياء

٢ ـ ١ الرياضة فى علم الفيزياء :

ذكرنا شيئاً عن استخدام الرياضة فى علم الفيزياء فى معرض الحديث عن قياس المشاهدات ، وعندما تكلمنا عن صياغة قوانين الفيزياء وبناء نظرياتها . وكانت المناقشة ترمى إلى إدخال فكرة عامة عن التطبيقات الرياضية فى الفيزياء والصيغ الرياضية التى يحتاج إليها هذا العلم . وكلا الموضوعين يحتاج إلى دراسة لقوانين الفيزياء ، وإلى إلمام تام بالقياسات الفيزيائية . ولا نريد حالياً الإفاضة فى شرح هذين المجالين البعيدين بعض الشيء ، ولكننا نرغب فى أن نبين وننمى على سبيل المثال ، بعض الفكر الرياضية الأولية السارية تقريباً فى بجميع آرائنا الفيزيائية .

والرياضة فى حد ذاتها علم كبير الاتساع والتنوع . والمنتظر أن تكون بعض فروعها الأولية مألوفة لدى الطالب . ولكننا نرجح عدم إلمامه بمعظم الفروع التى يفيد الكثير منها فى دراسة الفيزياء . ولا مناص من أن نفرض إلمامه بالحساب والجبر الابتدائى والهندسة المستوية فيما يأتى من البرهنة والإخراج . وسوف يضطرنا النقص فى الأداة الرياضية القوية إلى إهمال اعتبارات خاصة فى النظريات ومعالجة بعضها بطريقة مبسطة جداً . ومما يجب ذكره كحقيقة أن الفروع الأكثر تعقيداً فى الرياضة تؤدى أصعب الأعمال وأشقها فى علم الفيزياء بأبسط الطرق الممكنة ، كما يجب أن نؤكد أن الرياضة بالنسبة للفيزيائى ما هى إلا أداة وليست غرضاً فى حد ذاتها ، ولذا سوف نوجه أكبر الاهتمام إلى النواحى الفيزيائية .

٢ ـ ٢ الكميات غير المتجهة (القياسية) :

ربما كان أبسط استخدام الرياضة فى علم الفيزياء هو اضطلاعها بوضع أرقام للمقادير التى تقاس بها المشاهدات ، وتدل هذه الأرقام على عدد مرات

احتواء المشاهدة على الوحدة المستخدمة ، وهى الأرقام العادية نفسها المستخدمة فى العد ، فهى تجمع وتطرح وتضرب وتقسم ، وبالتالى تخضع لجميع العمليات الحسابية التى يعرفها القارئ .

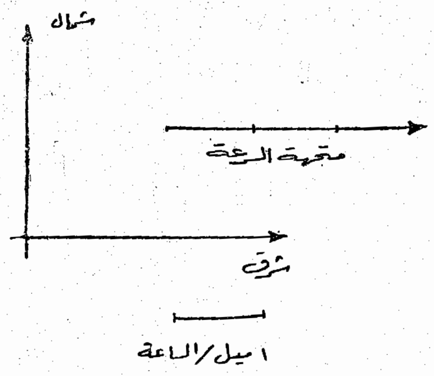
وعندما نبحث فى طبيعة المشاهدات الفيزيائية ، نجد أن الكثير منها قابل للقياس الذى من شأنه التعبير برقم معين مع وحدة مناسبة .. أى أن كميات كثيرة تحتوى على خاصية المقدار أو الجرم . فكميات مثل الكتلة ، والطول ، والمساحة ، وفترات الزمن تتعين تماماً بهذه الكيفية ، فالمشاهدات التى تحتاج إلى مقدار فقط (ووحدة بطبيعة الحال) لكى تتعين أو تحدد تحديداً كاملا تسمى كميات غير متجهة ، وهذه الكميات غير المتجهة هى أبسط الكميات الفيزيائية من وجهة نظر الرياضة . وأرقام قياسها — وتسمى بغير المتجهات اختصاراً — تتبع كل قوانين الحساب المعتادة ، مع حظر خاص يتعلق بنوع الوحدة المستخدمة . وهذا الحظر لا يكاد يحتاج إلى تنبيه ، فإن الإنسان لا يستطيع أن يجمع أو يطرح كميات غير متجهة مختلفة الوحدة ، كما أنه لا يستطيع أن يجمع تفاحاً وبرتقالا فى الحساب الابتدائى ، ولكن القياسات المتماثلة الوحدة يمكن جمعها أو طرحها . أما الضرب والقسمة فمسموح بإجرائهما على الكميات غير المتجهة المختلفة الوحدة . فالجبر الابتدائى الذى يدرسه الطالب يمكن تسميته على وجه أتم بجبر الكميات غير المتجهة ، أى أن الطالب متعود أصلا على حساب هذه الكميات غير المتجهة . غير أن هناك مشاهدات فى الفيزياء لا يمكن تطبيق جبر الكميات غير المتجهة عليها ، وسنعتبر الآن نوعاً منها .

٢ — ٣ الكميات المتجهة :

وأبسط الكميات الأكثر تعقيداً بالمقارنة بين المتجهات ، هى ما يطلق عليها اسم الكميات المتجهة . فالمتجهة هى كمية لها اتجاه خاص فى الفراغ علاوة على المقدار الدال عليها. والوصف الكامل للكمية المتجهة يحتاج إلى رقم قياس، ووحدة، وتحديد اتجاه بالنسبة لمرجع معين فى الفضاء . ويمكن اعتبار سرعة جسيم فى

مستوى أفقى مثالا للكمية الموجهة ، فمقدارها المسمى بمقدار السرعة (أو الانطلاق) هو المعدل الزمنى الذى تقطع به المسافة ، واتجاهها هو اتجاه حركة الجسيم ، التى يمكن تحديدها ، كما تحدد البوصلة اتجاه الشمال . وكمية متجهة أخرى شائعة الاستعمال هى الإزاحة ، وهى عبارة عن المقدار والاتجاه اللذين يتحرك بهما جسيم من نقطة إلى أخرى فى الفضاء ، وبعبارة أخرى إنها كمية متجهة ذات طول واتجاه . ومقدار أى كمية متجهة يسمى على وجه أكمل بالمقدار غير المتجه للكمية للتأكيد بأنه لا يحتوى على أن اتجاه ضمنى .

نحتاج فى وصف غير المتجهات إلى رقم ووحدة ، ولكن فى وصف المتجهات نحتاج إلى خاصية ثالثة ؛ هى الاتجاه الذى يجب أن تتضمنه . ويمكن تحديد الاتجاه بطرق شتى ، ربما كان أبسطها هو رسم صورة للمتجهة ، بمعنى أن يرسم سهم يدل طوله على مقدار المتجهة مشيراً فى اتجاهها . ويمكن تحديد الاتجاه بالنسبة لمجموعة محاور عادية متعامدة س ، ص فى المستوى الحاوى للمتجهة ، أو بالنسبة لاتجاه البوصلة ، أو بأية وسيلة أخرى مناسبة تدل على الاتجاه . وهذه الصورة مرسومة بشكل ٢ – ١ الذى يمثل طائرة تطير أفقياً فى اتجاه الشرق بانطلاق قدره ٣٠٠ ميل / الساعة . وتشير نهاية السهم المسماة بالمنتهى إلى اتجاه الحركة ، وتسمى النهاية الأخرى للمتجهة بالأصل (وهى خلاف نقطة الأصل والتى هى ملتقى المحاور ، وهى لا تهمنا الآن) . وطول هذا السهم ثلاثة من وحدات الطول ، كما هو ملاحظ من مقارنة مقياس الرسم المصاحب وحدته مائه ميل . ومما تجب الإشارة إليه أن طول السهم



(شكل ٢ – ١)

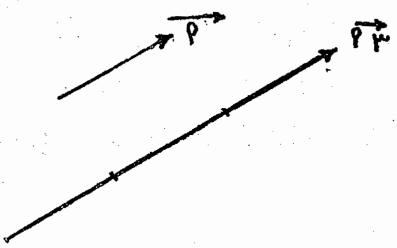
واتجاهه فقط هما الثابتان ، ويمكن رسمه فى أى مكان على الصفحة للسبب المنطقى نفسه ، بمعنى أنه يمكن تحريكه موازياً لنفسه بدون تغيير مدلوله . وكل سرعات

الطائرات التى مقدارها ٣٠٠ ميل / الساعة تمثل على مقياس الرسم نفسه بطول المتجهة المشار إليها (هذا إذا لم يؤخذ تكور الأرض فى الحساب) . ومن المناسب والمفيد أحياناً إزاحة المتجهات موازية لنفسها ، كما سوف نفعل عند مناقشة موضوع إضافة المتجهات . ورمز المتجهة هو حرف فوقه سهم مثل $\overrightarrow{ا}$ ، وكرمز لقيمة المتجهة يستخدم الرمز نفسه بدون السهم مثل ا فقط .

وتخضع المتجهات شأنها شأن غير المتجهات فى إجراءاتها إلى قواعد حسابية معينة ، ولكن بالنسبة لخاصتها الاتجاهية ، فإن جبر المتجهات أكثر تعقيداً من جبر غير المتجهات. وسوف نهتم بعمليتين فقط : ضرب المتجهات بغير المتجهات ، وإضافة المتجهات إلى المتجهات . ولا يمكن إضافة متجهات إلى غير متجهات لأنها كميات غير متجانسة ، وتوجد قواعد لضرب المتجهات بالمتجهات ، ولكن بما أننا لا نحتاج إليها فليس من الداعى مناقشتها .

٢ — ٤ جبر المتجهات :

إن أبسط العمليات الحسابية فى جبر المتجهات يتعلق بضرب المتجهة فى عدد موجب ، وشكل ٢ — ٢ يوضح ضرب المتجهة $\overrightarrow{ا}$ بالعدد ٣ . النتيجة هى متجهة جديدة ٣ $\overrightarrow{ا}$ ، اتجاهها هو اتجاه ا وقيمتها ٣ $\overrightarrow{ا}$. وعند ضرب المتجهة بعدد سالب أو كمية غير متجهة سالبة ، نصل إلى النتيجة

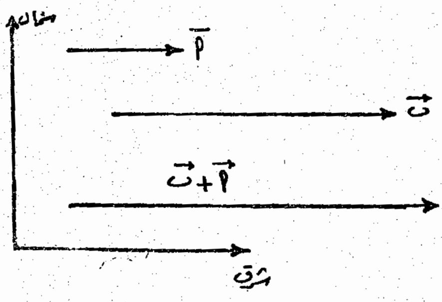


(شكل ٢ — ٢)

نفسها ، فيما عدا اتجاه المتجهة فهو يعكس . وهذا يشير إلى أن معنى المتجهة السالبة هو متجهة مكافئة فى القيمة ، ولكن مختلفة فى الاتجاه ، بمعنى أن — $\overrightarrow{ا}$ هو سالب $\overrightarrow{ا}$ ، إذ أن — $\overrightarrow{ا}$ = (— ١) $\overrightarrow{ا}$.

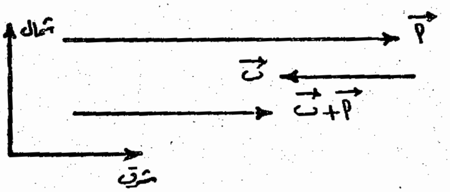
والعملية الثانية التى نحتاج إلى فهمها هى جمع المتجهات . فالمتجهات

المتماثلة فى النوع يمكن إضافتها بقاعدة تتوضح بالمثال التالى . لنفرض أن هناك متجهتى إزاحة أ ، ب ، تقعان فى المستوى ذاته ويراد جمعهما . أى تركيبهما لإعطاء إزاحة كلية . هذه النتيجة الناشئة من إضافة المتجهات تسمى المتجهة المحصلة . وحيث إن كل إزاحة تمثل انتقال الجسم مسافة معينة فى اتجاه معين ، فمن الواضح أن الإزاحة المحصلة هى النتيجة المجمعة لهذين الانتقالين . فإذا فرضنا أن كلا من أ ، ب يشير إلى الشرق ، فإن الموقف يتمثل بشكل ٢ — ٣ ، والنتيجة أن المحصلة هى أ + ب ، قيمتها ا + ب وتشير إلى الشرق أيضاً . ولذا ففى إضافة المتجهات المتوازية تشير المحصلة فى اتجاه المتجهتين الأصليتين ، وتكون قيمتها



(شكل ٢ — ٣)

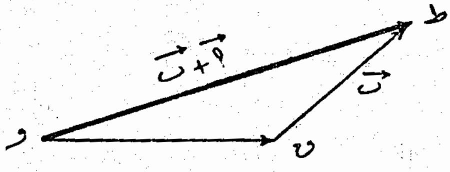
حاصل جمع القيمتين المفردتين لهما . وإذا كانت إحدى المتجهتين المتوازيتين سالبة ، كما فى شكل ٢ — ٤ فإن المحصلة تكون أقل من إحداهما أ لأن قيمتها هى ا + (— ب) = ا — ب .



(شكل ٢ — ٤)

وإذا كانت إحدى المتجهتين مساوية الأخرى تماماً فإن المحصلة تكون صفراً ، كما هو الحال فى حساب غير المتجهات .

وليس من الضرورى قصر إضافة المتجهات على المتجهات المتوازية ، لأنه فى العادة يكون المطلوب جمع متجهات متحدة النوع بصرف النظر عن اتجاهاتها فى الفضاء . اعتبر على سبيل المثال جمع متجهين غير متوازيتين كما بشكل ٢ — ٥ ، وإذا فرضنا أنهما يمثلان إزاحتين ، فإن المحصلة لا بد أن تعطى إزاحة هى النتيجة المجمعة



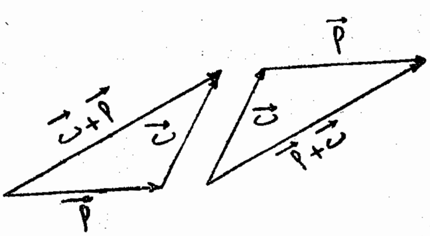
(شكل ٢ — ٥)

للإزاحتين المفردتين . . أى أن محصلة الإزاحة تأخذ الجسم المزاح من موضع أصلى إلى موضع نهائى ، وتجرى هذه العملية كما لو كنا قد أجرينا الإزاحتين إحداهما بعد الأخرى . وهذا يعنى فى قواعد الهندسة البسيطة أن المتجهة المحصلة هى الضلع الثالث لمثلث ضلعاه الآخران هما المتجهتان المراد إضافتهما . وفى التركيب الممثل بشكل ٢ – ٥ ، تتم الإزاحة من و إلى ق بوساطة المحصلة $\overrightarrow{ا} + \overrightarrow{ب}$ ، بالكيفية نفسها تماماً ، كما لو أجريت بوساطة المتجهتين المفردتين $\overrightarrow{ا}$ ، $\overrightarrow{ب}$ خلال النقطة المتوسطة ط . . لذا فإننا نحصل على المحصلة $\overrightarrow{ا} + \overrightarrow{ب}$ بتكملة المثلث حسب القاعدة الآتية :

« إن محصلة متجهتين تقع دائماً على استقامة الضلع الثالث لمثلث يتكون بوضع أصل المتجهة الثانية عند منتهى الأولى ، ويكون أصل المتجهة المحصلة هو أصل المتجهة الأولى ، ومنتهاها هو منتهى المتجهة الثانية » .

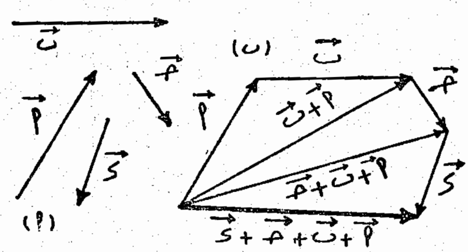
ويتضح الاصطلاح الخاص بالأصول والمنتهيات على أتم وجه ، إذا نفذنا ببصرنا إلى المعنى الحقيقى للتأثير المجمع لإزاحتين متجهتين .

فى تركيب المحصلة لا يهم الترتيب الذى نضيف به المتجهات ، ويتضح هذا من الهندسة الممثلة بشكل ٢–٦ ، حيث تضاف المتجهتان $\overrightarrow{ا}$ ، $\overrightarrow{ب}$ بالترتيب $\overrightarrow{ا}$ قبل $\overrightarrow{ب}$ للحصول على $\overrightarrow{ا} + \overrightarrow{ب}$ ثم بالترتيب $\overrightarrow{ب}$ قبل $\overrightarrow{ا}$ للحصول على $\overrightarrow{ب} + \overrightarrow{ا}$. والنتيجة



(شكل ٢ – ٦)

أن المتجهتين $\overrightarrow{ا} + \overrightarrow{ب}$ ، $\overrightarrow{ب} + \overrightarrow{ا}$ متساويتان ، وأن الترتيب الذى تؤخذ به المتجهات للحصول على المجموع لا يهم (يسمى هذا بالقانون العكسى لإضافة المتجهات) ، وبطبيعة الحال تخضع الأرقام العادية لهذا القانون فى الإضافات الحسابية ، فإن ٥ + ٨ تعطى مجموعاً يماثل ٨ + ٥ .

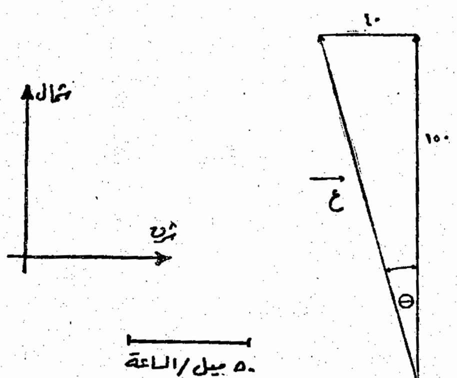


(شكل ٢ – ٧)

وامتداد قاعدة إضافة المتجهات لأكثر من اثنتين فى مستوى واحد يبينه شكل ٢ – ٧ الذى يمثل إضافة المتجهات $\vec{ا}$ ، $\vec{ب}$ ، $\vec{حـ}$ ، $\vec{ء}$ بالترتيب المذكور . فمنه نرى أن المحصلات المتوسطة $\vec{ا} + \vec{ب}$ ، $\vec{ا} + \vec{ب} + \vec{حـ}$ ليست ضرورية فى الوصول إلى النتيجة النهائية ، وأنه يمكن تبسيط التركيب برسم $\vec{ا}$ ، $\vec{ب}$ ، $\vec{حـ}$ ، $\vec{ء}$ من ابتداء $\vec{ا}$ إلى نهاية $\vec{ء}$. أى أنه عند إضافة أكثر من متجهتين مشتركتين فى المستوى نفسه ، نحصل على المحصلة بقفل ضلع المضلع الذى تمثل أضلاعه الأخرى المتجهات الأصلية ، بشرط أن تتم عملية الإضافة بوضع أصل كل متجهة عند منتهى المتجهة السابقة لها . ومن السهل أن نبين هندسياً ، أن قانون التجميع ينطبق على الحالة الممثلة بشكل ٢ – ٧ ، أى أن المحصلة لا تتوقف على ترتيب الإضافة .

تمرين على إضافة المتجهات :

كتطبيق على قاعدة إضافة المتجهات ، اعتبر طيارة تطير شمالا فى مستوى أفقى بسرعة ١٥٠ ميلا / الساعة عمودياً على رياح تأتى من الشرق بسرعة ٤٠ ميلا / الساعة . إن محصلة هاتين السرعتين هى سرعة الطيارة بالنسبة إلى الأرض ، وشكل ٢ – ٨ يمثل تركيب المحصلة $\vec{ع}$. ويمكن تحديد اتجاه المحصلة بقياس الزاوية Θ بآلة قياس الزوايا (منقلة) والحصول



(شكل ٢ – ٨)

على قيمة ع بقياس طولها بمقياس* ، وفى شكل ٢ – ٨ ، ع = ١٥٥ ميلا الساعة ، θ = ١٥° .

فرضنا فيما سبق أن المتجهات الداخلة فى اعتبارنا تقع فى المستوى نفسه ، والحقيقة أن هذا التحديد ليس ضرورياً . فمن الواضح عند إضافة متجهتين أنه يمكن اعتبارهما فى المستوى نفسه ، إذا تحركت إحداهما موازية لنفسها حتى تتقاطع مع الأخرى ، وذلك لأن أى مستقيمين متقاطعين يحددان مستوى . وتقع المحصلة بطبيعة الحال فى المستوى المختار وفقاً لقاعدة تركيب المثلث فى هذا المستوى . وفى حالة أكثر من متجهتين لا يوجد فى العادة مستوى مشترك بينها ، ولكن يمكن تركيب المحصلة بالطريقة المبينة فى شكل ٢ – ٧ ، فيختار المستوى الذى يجمع $\vec{\text{ا}}$ ، $\vec{\text{ب}}$ بالطريقة التى أشرنا إليها ثم ترسم $\vec{\text{ا}} + \vec{\text{ب}}$ فى هذا المستوى، ثم يختار المستوى الذى يجمع $\vec{\text{ا}} + \vec{\text{ب}}$ ، $\vec{\text{ح}}$ وترسم $\vec{\text{ا}} + \vec{\text{ب}} + \vec{\text{ح}}$ فى المستوى الجديد، وأخيراً نختار المستوى الذى يجمع بين $\vec{\text{ا}} + \vec{\text{ب}} + \vec{\text{ح}} + \vec{\text{ى}}$ ، ثم ترسم المحصلة النهائية $\vec{\text{ا}} + \vec{\text{ب}} + \vec{\text{ح}} + \vec{\text{ى}}$ فى المستوى الأخير . ويمكن بطريقة أخرى إيجاد المحصلة برسم مضلع مفتوح أضلاعه $\vec{\text{ا}}$ ، $\vec{\text{ب}}$ ، $\vec{\text{ح}}$ ، $\vec{\text{ى}}$ ليست فى مستوى واحد وقفله بالضلع $\vec{\text{ا}} + \vec{\text{ب}} + \vec{\text{ح}} + \vec{\text{ى}}$ الذى يمثل المحصلة .

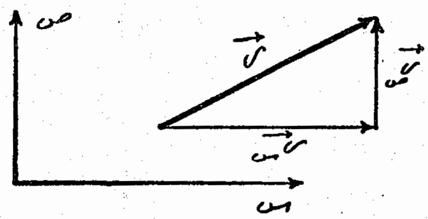
٢ – ٥ المركبات المتعامدة للمتجهة :

من المفيد أحياناً تحليل متجهة إلى متجهتين ، أى مركبتين أخريتين متعامدتين ، بحيث إن حاصل جمعهما المتجه هو المتجهة الأصلية . وفى العادة توجد اتجاهات مفضلة لتحليل المتجهات ، هى مجموعة إحداثيات مثل س ، ص المبينة بشكل ٢ – ٩ تبين عليها المركبتان السينية والصادية لموجهة السرعة التى نرمز إليها بالرمز

---

* من السهل استخدام حساب المثلثات فى يد القارئ المتمرن على هذا النوع من الحساب فإن ظا θ = $\frac{٤٠}{١٥٠}$ ومنه θ = ٥٥َ ١٤° ، جا θ = $\frac{٤٠}{\text{ع}}$ ولذا فإن ع = ١٥٥٫٤ ميل / الساعة .

$\vec{\text{ر}}$ حالياً (، $\vec{\text{ع}}$ فيما بعد) . من الواضح أن نظرية فيثاغورث تنطبق لإيجاد قيمة $\vec{\text{ر}}_{\text{س}}$ ، $\vec{\text{ر}}_{\text{ص}}$: وتتلخص فى أنه فى أى مثلث قائم الزاوية يكون مربع الوتر مساوياً لمجموع مربعى الضلعين الآخرين، فى شكل ٢–٩ ،



(شكل ٢ – ٩)

$$\vec{\text{ر}}^{\,٢} = \vec{\text{ر}}^{\,٢}_{\text{س}} + \vec{\text{ر}}^{\,٢}_{\text{ص}} \qquad \text{. . . . .} \qquad (٢ - ١)$$

فمثلا سرعة الطيارة التى بحثناها فى البند السابق لها مركبتان متعامدتان ١٥٠ ميلا / الساعة شمالا ، ٤٠ ميلا / الساعة غربا، وقيمة سرعتها ر ، المسماة الانطلاق، تحدد بالمعادلة :

$$\text{ر}^{٢} = (١٥٠)^{٢} + (٤٠)^{٢} = ٢٤ ، ١٠٠$$

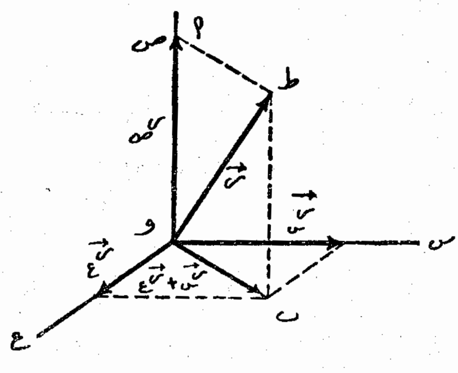
$$\text{ر} = ١٥٥{,}٤ \text{ ميلا / الساعة}$$

ويمكن إيجاد اتجاهها باستخدام « منقلة » ويفضل استخدام العلاقة المثلثية (ظا $\Theta = \frac{٤٠}{١٠٠}$) .

فعملية الحصول على المركبات لأية متجهة – بفرض وجود مجموعة إحداثيات – تتلخص فى تكوين مثلث متجهات ، بحيث إن المركبات تضاف لإيجاد المتجهة الأصلية. ففى المركبات المتعامدة، التى يمثلها شكل ٢– ٩ ، يكون هذا المثلث بتقاطع مستقيم مرسوم من أصل $\vec{\text{ر}}$ موازياً لمحور السينات مع مستقيم مرسوم من منتهى $\vec{\text{ر}}$ موازيا لمحور الصادات ، ويمكن التحقق من أصول ومنتهيات المركبات بقاعدة المثلث التى تؤكد أن مجموع المركبات هو نفسه المتجهة الأصلية .

ويمكن الحصول على المركبات فى الثلاثة أبعاد باتباع الطريقة المبينة فى شكل ٢–١٠

التى تبين المركبات س ، ص ، ع للمتجهة $\vec{ر}$. أسهل هذه المركبات هى $\vec{ر}_{ص}$ ، ويتم الحصول عليها برسم المستقيم ط ا موازياً للمستوى س ع . وهذا يحدد المثلث و ب ط والمركبة $\vec{ر}_{س} + \vec{ر}_{ع}$. وبرسم المركبتين $\vec{ر}_{س}$ ، $\vec{ر}_{ع}$ فى المستوى س ع ، يتم الحصول على جميع المركبات .



(شكل ٢ – ١٠)

ويمكن تطبيق نظرية فيثاغورث مرتين للتحقق من العلاقة بين $\vec{ر}$ ومركباتها .

ومن الشكل نرى أن

$$\vec{ر}^{\,٢} = \vec{ر}_{ص}^{\,٢} + \vec{وب}^{\,٢}$$

ولكن $$\vec{وب}^{\,٢} = \vec{ر}_{س}^{\,٢} + \vec{ر}_{ع}^{\,٢}$$

$$\therefore \quad \vec{ر}^{\,٢} = \vec{ر}_{س}^{\,٢} + \vec{ر}_{ص}^{\,٢} + \vec{ر}_{ع}^{\,٢} \quad \ldots \quad (٢ – ٢)$$

ومن الواضح أن هناك ٣ زوايا تحدد اتجاه الموجهة الأصلية (زاوية لكل محور من المحاور الثلاثة) ، وهذه الزوايا توجد بالطرق المعتادة .

تمارين

١ – ما طول وتر المثلث القائم الزاوية الذى ضلعاه ٣٠ سم ، ٤٠ سم ؟

٢ – ارسم مع مراعاة نسبة للرسم المتجهات الآتية واستنتج محصلتها : (١) ٢٠ سم شمال شرق ، (٢) ٥٠ سم جنوباً ، (٣) ٣٠ سم شمال غرب ، (٤) ٣٠سم جنوبا

٣ – أعد تمرين رقم ٢ معتبراً الإضافة بالترتيب الآتى : (ا) ١ + ٣ + ٤ + ٢ ، (ب) ٤ + ٣ + ١ + ٢ .

٤ – متجهة إزاحة ٥٠ سم طولا تعمل زاوية ٤٥° مع الأفقى . ما هما مركبتاها

الأفقية والرأسية ؟

الجواب : ٣٥,٤ سم لكل منهما .

٥ ــ تعمل المركبة الأفقية زاوية ٤٥° مع متجهتها وقيمة المركبة ٨ سم . ما قيمة المتجهة نفسها ؟

الجواب : ١١,٣ سم .

٦ ــ قوتان ٤ × ١٠⁻ ¹² داين، ٠,٠٣ × ١٠⁻ ¹⁰ داين تؤثران على جسيم ، والزاوية بين القوتين ٩٠° . ما قيمة محصلة القوة ؟

٧ ــ متجهة إزاحة فى فضاء ذى ثلاثة أبعاد لها المركبات الآتية : ١٢ سم على طول س ، ٤ سم على طول ص ، ٧ سم على طول ع . ما قيمة الموجهة ؟

الجواب : ١٤,٥ سم .

الفصل الثالث

ديناميكا الجسيمات ـ الحركة المعجلة

٣ ـ ١ علم الديناميكا :

إن فهم حركة الأجسام المادية ، يعتبر بحق الثمرة الأول لاستخدام علم الفيزياء . فعلم الحركة أو الديناميكا (وهو جزء من علم الفيزياء) ، قد أمدنا بطريقة ، وزودنا بمعلومات ، مكنتنا ولا تزال تمكننا من زيادة فهمنا للطبيعة أو الكون . وترتبط أسماء « جاليليو » و « نيوتن » بصفة خاصة بالأبحاث الأولى فى هذا الموضوع ، لأنهما كانا أول من نفذا ببصرهما إلى أهمية المشاهدات فى حركة الأجسام ، وإلى كنه القوانين التى تربط بينها . وحتى حديثاً وبرغم نشوء كل من النظرية النسبية ونظرية الكم ، لم تحدث تغيرات ذات قيمة فى آرائهما الأساسية . وبمرور الوقت ، زاد استخدام قواعد الديناميكا ، وتوثقت روابطها حتى يمكن القول بأن آراء « نيوتن » فى علم الديناميكا لا تزال قائمة بالعمل وحدها فى معظم نواحى العلم والتكنولوجيا . أما التعديلات التى تتطلبها النظرية النسبية ونظرية الكم فهى ضرورية فقط ، فى أحوال خاصة تكون السرعات فيها كبيرة والجسيمات صغيرة الحرم .

وعلم الديناميكا أساس صالح لدراسة المادة والفيزياء الذرية ، فإن استكمال عناصر هذا العلم فى وقت مبكر ، واتساع تطبيقاته على المشاهدات المباشرة للحركة ، فى عالمنا الذى نعيش فيه ، قد أمدنا بمجموعة من القواعد لا نزال نستخدمها فى جميع الفروع الأخرى من الفيزياء . ولا يعنى هذا أن جميع مسائل الكون يمكن حلها بقواعد الديناميكا النيوتونية ، وإنما الأرجح أن قواعد الديناميكا ونتائجها قد استخدمت ،كأداة تتيح لنا تفهم علم الفيزياء الحديث وأجزائه البحتة . إن جزءاً كبيراً جداً من مسائل علم الفيزياء يتعلق بالأجسام المادية . وحتى عندما تطغى بعض اعتبارات الطبيعة الأخرى ، فلا تزال الحاجة ماسة إلى علم الحركة لهذه الأجسام ، وهذا المبدأ صحيح فى ميدان الفيزياء الذرية حيث تحظى الطبيعة الكهربية للجسيمات الذرية ، وما يتعلق بها وخصائص حجومها الصغيرة بالاعتبار الأول .

٣ ــ ٢ الجسيمات أو الدقائق :

إن أبسط أجزاء علم الديناميكا ، هو الذى يعالج حركة ما يسمى بالجزيئات أو الدقائق ، وهى أجسام صغيرة الجرم ومبتعدة بعضها عن بعض بقدر يسمح بإهمال تركيباتها وحركاتها الداخلية . فنحن نهتم بحركة الجسيم ككل أو وحدة ونهمل أى تغير فى شكله أو حجمه يكون ناتجاً عن الشد أو اللى مثلا ، كما نهمل أى حركة داخلية فيه مثل قابليته للدوران حول محور داخلى . وهذا معناه أننا نعتبر هذه الدقائق نقطاً لها خاصية الأجسام المادية ، وندرس حركاتها وسرعاتها ومساراتها .

وفى كثير من الخواص الوصفية المتعلقة بالفيزياء الذرية نستخدم مثل هذه الدقائق ، وتعتبر ديناميكيتها البسيطة كافية لدراستها . ولأغراض كثيرة نعتبر الذرات والجزيئات دقائق مثالية ذات قوة تماسك كبيرة ولحركاتها الداخلية أهمية ثانوية فى الديناميكا الذرية .

٣ ــ ٣ الفضاء والحركة :

تتعلق فكرة الحركة فى الديناميكا بالجسم المتحرك ، كما تتعلق بالفضاء الذى يتحرك فيه الجسم . ولابد من افتراض أن كلا من الجسم والفضاء هو تعبير بديهى ، إذ أن من الصعب تحليله إلى تعبيرات أبسط منه ، والحقيقة أنهما متلازمان ومتكاملان ، لأن فكرة الفضاء الفيزيائى مؤسسة على مراكز إحداثيات هى فى الواقع أجسام قابلة للمشاهدة ، كما أن فكرة الجسيم تعنى احتجاز جزء من الفضاء يشغله الجسم .

وأن الوصف الكمى للفضاء يحتوى على مسافات تعطى أطوالها معان بدلالة عملية قياس تستخدم فيها أجسام على شكل مساطر للقياس . وللفضاء كيان فله يمين ويسار ، وفوق وتحت . وهو إما فضاء مستوى وإما منحن . ويجب أن نأخذ فى الاعتبار هذه الصفات كما تحددها التجربة الشائعة .

وهناك ثلاث كميات تقبل المشاهدة فى الفضاء تسمى أحياناً بالمتغيرات الفضائية وهذه المتغيرات ذات الأهمية الأساسية هى الإزاحة ، والسرعة ، والعجلة ، وهى كميات متجهة . فالإزاحة ، كما ذكرنا قبلا ، عبارة عن متجهة تصف انتقال الجسم

من نقطة إلى أخرى فى الفضاء ، وقيمتها هى الطول أو المسافة المقطوعة ، واتجاهها هو الاتجاه الذى تنشا فيه الحركة ، وهى ترسم كسهم ذى اتجاه يربط نقطة الابتداء ونقطة الانتهاء للحركة ، ووحداتها هى وحدات الطول ، أى السنتيمتر أو القدم أو الميل ، وأولى هذه الوحدات من وحدات س . ج . ث . وشأنها شأن جميع المتجهات التى تحتاج فى مواصفاتها إلى مجموعة من الإحداثيات الثابتة تسمى مجموعة المراجع ، وغالباً ما يكون المشاهد ثابتاً فى مجموعة المراجع المستخدم ، وفى هذه الحالة يسمى بمجموعة المراجع للمشاهد . فمثلا غرفة المعمل التى يسقط فيها جسم ، تسمى بمجموعة المراجع لحركة السقوط ، لأن الذى يسترعى انتباهنا هو الحركة بالنسبة للأرضية والسقف وحوائط الغرفة . وإذا أريد منا أن ننسب هذه الحركة إلى مجموعة مراجع جديدة مثل غرفة المصعد الكهربى المتحركة فإن النتائج قد تظهر مختلفة تماماً . ومن المفروض دائماً أن أبعاد الجسم فى الديناميكا المعتادة مستقلة عن نظام الإحداثيات المستخدم فى القياس ، ولكن هذه العقيدة قد اهتزت كثيراً بنشوء النظرية النسبية. وبالنسبة لأغراضنا الحالية يكفينا الاعتبار الأول.

وتعرف السرعة بنسبة الإزاحة إلى الزمن اللازم لإتمام هذه الإزاحة . وحيث إنها كمية متجهة مقسومة على كمية غير متجهة ، فإن السرعة لابد أن تكون متجهة ومشيرة فى إتجاه الإزاحة ، وتسمى قيمة السرعة بالانطلاق. وإذا رمزنا بالرمز ف إلى الإزاحة وبالرمز ن إلى الزمن ، فإن السرعة تعرف رمزياً بأنها :

$$\vec{ع} = \frac{\vec{ف}}{ن}$$

وحدة السرعة فى نظام س . ج . ث . هى سنتيمتر فى الثانية أو (سم / ث) . وكما ذكرنا فى الإزاحة ، لابد من وجود مجموعة مراجع تقاس فيه السرعة . والحقيقة أن كلا من قيمة السرعة واتجاهها يعتمد على مجموعة المراجع المستخدمة فى المشاهدة . فمثلا الشخص الجالس فى قطار يعتبر ساكناً بالنسبة لمجموعة المراجع الموجودة بغرفة القطار ، بينما يعتبر متحركاً بسرعة ٦٠ ميلا / الساعة مثلا بالنسبة لمشاهد بجانب القضيب .

٣ ــ ٤ السرعات المنتظمة والآنية والمتوسطة :

يتم قياس السرعة بالكيفية الآتية : نختار نقطتين على طول مسار الجسم المتحرك ، وتكون هاتان النقطتان ثابتتين بالنسبة للمشاهد ، والمسافة بينهما معروفة . ثم نقيس الفترة الزمنية اللازمة لينتقل الجسم من إحدى النقطتين إلى الأخرى . من هذا نحصل على الانطلاق أو القيمة العددية للسرعة وهو :

$$\text{قيمة السرعة} = \frac{\text{المسافة المقطوعة بين نقطتين مجموعة في مع جرا}}{\text{الزمن اللازم لقطع هذه المسافة}}$$

واتجاه السرعة هو الاتجاه النسبي الذى تعمله النقطة الثانية بالنسبة للأولى وإذا كانت الحركة مستقيمة وذات انطلاق ثابت، فإن الإجراء الذى اتبعناه يكون مناسباً حتمياً دون غموض . وفى هذه الحالة لا يكون ضروريا بالمرة فرض قيود على المسافة المقطوعة بين النقطتين أو على الزمن المستغرق . وتوصف مثل هذه السرعة بأنها منتظمة .

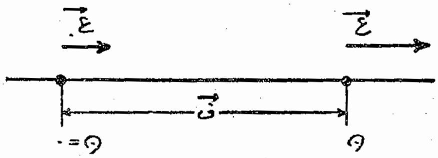
إن مستلزمات السرعة المنتظمة ، وهما على وجه التحديد ، الاتجاه الثابت والانطلاق الثابت يوحيان إلينا بكيفيتين يمكن أن تتغير بوساطتهما السرعة . وسوف نؤجل حالياً مناقشة العامل الذى يدخله تغير الاتجاه على السرعة إلى فرصة أخرى (بند ٣ ــ ٧) . ولنعتبر الآن جسيما يسير فى خط مستقيم ، ولكن بانطلاق متغير ، مثل كرة من الرخام « بلية » تتدحرج ساقطة على مستوى مائل من الواضح أنه لا توجد قيمة موحدة لمتجهة السرعة طول الوقت ، لأن طول هذه المتجهة يتغير باستمرار طول الوقت . ولتطبيق الإجراء المتبع لقياس السرعة ، نختار نقطتين على مسار الجسيم المتحرك متقاربتين إلى حد يسمح بإهمال تغير الانطلاق بينهما . أى نعتبر السرعة ثابتة فى الفترة الزمنية الصغيرة اللازمة لقطع المسافة بين هاتين النقطتين . ولتحسين إجراءات الحساب ، علينا أن نختار نقطتين أكثر قرباً . وعندئذ يكون الزمن اللازم أقصر ، عند ما تتقارب النقطتان قرباً لا نهائياً ، يمكننا القول بأننا نقيس السرعة فعلا عند نقطة واحدة ، وفى اللحظة التى مر بها الجسيم على هذه النقطة . وتسمى هذه السرعة بالسرعة اللحظية أو الآنية للجسيم،

ونرمز إليها بالرمز الذي يدل على السرعة المنتظمة وهو ع . ولكتابة معادلة محددة للسرعة اللحظية ، سوف نستخدم رمزاً △ (دلتا) ليدل على « تغير بسيط فى » ، فمثلا △ ف هو تغير بسيط فى المسافة ، △ ن تعنى فترة زمنية صغيرة (ويلاحظ أن △ لا تعنى عاملا من عوامل الضرب ، ولكنها فى الواقع اختصار للجملة التى تدل على معناها) . لذا تعرف السرعة اللحظية هكذا :

$$ع = \frac{\triangle ف}{\triangle ن}$$

من الواضح أنه إذا كانت السرعة منتظمة ، فإن السرعة يكون لها فى كل مكان هذه القيمة المنتظمة الثابتة . أما إذا لم تكن السرعة منتظمة ، فإنه يصبح من العسير ، إن لم يكن من المستحيل ، قياس السرعات اللحظية ، لأنه لا توجد عندئذ وسيلة محددة لقياس المسافات أو الأزمنة المتناهية فى الصغر . بالرغم من هذا سوف نجد أنه يمكن حساب هذه السرعات من ظروف خاصة ، إذا عرفنا متغيرات أخرى معينة من متغيرات الفضاء للجسيم المتحرك .

إذا كان الجسيم يتحرك فى خط مستقيم بسرعة غير منتظمة، فإن قياس الإزاحة الكلية والزمن الكلى اللازم لهذه الإزاحة يعطينا فقط ما يسمى بالسرعة المتوسطة. فى هذه الحالة فإن تعريفنا



(شكل ٣ — ١)

للسرعة الذى يتلخص فى قسمة مسافة على زمن يعطى فقط قيمة متوسطة للسرعة ع . إلا إذا كان هناك معلومات أخرى تفيد بأن السرعة منتظمة . لذا فإن :

$$\text{متوسط } \vec{ع} = \frac{\vec{ف}}{ن}$$

ويتلخص الموقف فيما يأتى : إذا كانت الحركة الخطية غير منتظمة فإن السرعة اللحظية ، $\vec{ع} = \frac{\triangle \vec{ف}}{\triangle ن}$ ، تتغير بتقدم الجسيم فى مساره ، وتكون لها

سرعة متوسطة هى متوسط $\vec{\text{ع}} = \frac{\vec{\text{ف}}}{\text{ن}}$. وهذه الأخيرة تختلف عادة عن السرعة اللحظية . وإذا كانت الحركة منتظمة ، فإن السرعة اللحظية تكون واحدة على طول الخط وتساوى السرعة المتوسطة . فى هذه الحالة فقط نستطيع التكلم عن سرعة منتظمة أو ثابتة $\vec{\text{ع}}$.

٣ ــ ٥ الحركة المعجلة (ذات العجلة) :

من الأهمية بمكان فى علم الديناميكا معرفة الكيفية التى تتغير بها سرعة جسم، وتوصف تغيرات سرعة الجسم بما يسمى عجلة الجسم . وتعرف هذه بأنها التغير فى السرعة مقسوماً على الزمن اللازم لهذا التغير . لنفرض أنه عند اللحظة التى تبدأ فيها المشاهدة ، أى عند ن = ٠ تكون السرعة اللحظية $\vec{\text{ع}}_{\cdot}$ (شكل ٣ ــ ١) وأنه بعد ن من الثوانى تكون السرعة اللحظية $\vec{\text{ع}}$ ، فى هذه الحالة تعرف العجلة تعريفاً رمزياً هكذا :

$$\vec{\text{ح}} = \frac{\vec{\text{ع}} - \vec{\text{ع}}_{\cdot}}{\text{ن}}$$

وحيث إن العجلة تقاس بقسمة كمية متجهة على أخرى غير متجهة ، فإن العجلة نفسها عبارة عن متجهة تشير فى الاتجاه الذى تزداد فيه السرعة . ونحصل على وحدة س. ج . ث. للعجلة من الوحدتين المقابلتين للسرعة والزمن فى هذا النظام . فهى إذن سنتيمتر فى الثانية لكل ثانية أى : (سم/ ث / ث أو سم / ث^{٢}) . لاحظ أن السرعة هى معدل التغير الزمنى للمسافة ، بينما العجلة هى معدل التغير الزمنى للسرعة . والعجلة مثل السرعة يمكن أن تكون منتظمة ، ويمكن أن تكون متغيرة (يوحى هذا بتعريفات مستمرة مثل معدل التغير الزمنى للعجلة نفسها ، ومعدل التغير الزمنى لهذا المعدل الأخير وهكذا . لحسن الحظ لا نلجأ فى علم الفيزياء إلا قليلا لمثل هذه التعاريف الإضافية) . وإذا كانت العجلة متغيرة ، فإننا نحتاج إلى تعريف العجلة اللحظية بتلك الكيفية التى عرفنا بها السرعة اللحظية .

وسوف نهتم فى هذا الكتاب بالعجلات المنتظمة (أو على الأقل بالمنتظمة فى المقدار) وسنهمل المواضيع التى تتغير فيها العجلة تغيراً أكثر تعقيداً .

ومما يجب أن نلفت النظر إليه بعناية ، أن العجلة لا تعطى معلومات ألبتة عن قيمة السرعة فى أية لحظة ، وإنما هى تبين تغير السرعة مع الزمن . فمثلا « البلية » المتدحرجة التى أشرنا إليها ، قد تكون عجلتها ١٠٠ سم / ث^{٢} . وهذا يعنى أنه مهما كانت قيمة السرعة ، فإن السرعة تزيد بمقدار ١٠٠ سم /ث فى كل ثانية ، فقد تكون قيمة السرعة فى لحظة ما ٥٠ سم / ث . هذا يعنى أنه بعد ثانية من الزمن تكون السرعة ١٥٠ سم / ث . بينما إذا كانت السرعة فى لحظة المشاهدة الأولى ١٠ سم /ث ، فإنها بعد ثانية من الزمن تصير ١١٠ سم / ث . وفى كلتا الحالتين لا توجد سوى العجلة نفسها .

٣ – ٦ العجلة المنتظمة :

فى كثير من الحركات فى علم الديناميكا تكون العجلة منتظمة أو ثابتة فى المقدار أو الاتجاه . نصادف هذا فى الحالة البسيطة التى تتمثل بسقوط الأجسام من حالة السكون إلى الأرض ، عند ما تهمل مقاومة الهواء الجوى لهذه الحركة . وهذا حقيقى من ناحية المقدار فى المسائل الأخرى الأكثر تعقيداً ، التى تتضمن حركة على مسار منحن . وتسمى هذه المسائل بمسائل القوة المنتظمة ، وسنعالج بعضها فى فصل تال . وفى الوقت الحاضر سوف نشتق العلاقات بين الإزاحات والسرعات والعجلات والزمن فى حالة الحركة الخطية (أى التى تكون فى خط مستقيم) تحت عجلة منتظمة .

سنفرض أن جسما يتحرك بعجلة منتظمة . من الواضح بما أن الجسم يتحرك فى خط مستقيم ، فإزاحته وسرعته وعجلته تكون كميات متجهة تشير فى الاتجاه نفسه (شكل ٣ –١) . ولذا سوف نترك اصطلاحات الرموز المتجهة ونعالجها كما لو كانت كميات غير متجهة . وكما سبق سوف نفرض للجسم سرعة لحظية ابتدائية ع. فى اللحظة التى نبدأ فيها حساب الزمن أى عند ما تكون ن = ٠ ، وبما أن

الجسيم يتحرك بعجلة ، فبعد ن من الثواني تكون سرعته ع مختلفة عن ع. ، وعندئذ يمكن تعيين ع من تعريف العجلة .

$$\text{حـ} = \frac{\text{ع} - \text{ع}_{0}}{\text{ن}}$$

$$\text{ع} = \text{ع}_{0} + \text{حـ}\,\text{ن} \quad \ldots\ldots \quad (٣ - ١)$$

ومن تعريف متوسط السرعة يمكننا أن نكتب

$$\overrightarrow{\text{ع}} = \frac{\text{ف}}{\text{ن}} \quad \text{أو} \quad \text{ف} = \overrightarrow{\text{ع}} \times \text{ن}$$

وبما أن السرعة تتغير بانتظام ، فإن متوسط السرعة ، $\frac{\text{ف}}{\text{ن}}$ يساوى المتوسط الحسابى لكل من السرعتين : الابتدائية والنهائية .

$$\overrightarrow{\text{ع}} = \frac{\text{ع}_{0} + \text{ع}}{٢}$$

ومن المعادلة ٣ — ١ ،

$$\overrightarrow{\text{ع}} = \tfrac{1}{2}(\text{ع}_{0} + \text{ع}_{0} + \text{حـ}\,\text{ن}) = \text{ع}_{0} + \tfrac{1}{2}\text{حـ}\,\text{ن}$$

$$\therefore \text{ف} = \overline{\text{ع}} \times \text{ن} = (\text{ع}_{0} + \tfrac{1}{2}\text{حـ}\,\text{ن})\,\text{ن}$$

$$\text{أو} \quad \text{ف} = \text{ع}_{0}\,\text{ن} + \tfrac{1}{2}\text{حـ}\,\text{ن}^{2} \quad \ldots\ldots \quad (٣ - ٢)$$

معادلة ٣ — ١ مستقلة عن ف ، ومعادلة ٣ — ٢ مستقلة عن ع ، لذا فمن المفيد الحصول على علاقة مستقلة عن ن . وللوصول إلى العلاقة المطلوبة نتلخص من ن فى المعادلتين ٣ — ١ ، ٣ — ٢ هكذا .

من ٣ — ١ $\quad \text{ن} = \frac{\text{ع} - \text{ع}_{0}}{\text{حـ}}$

ومن ٣ — ٢ $\quad \text{ف} = \text{ن}\,(\text{ع}_{0} + \tfrac{1}{2}\text{حـ}\,\text{ن})$

وبالتعويض $\quad \text{ف} = \left(\frac{\text{ع} - \text{ع}_{0}}{\text{حـ}}\right)\left(\text{ع}_{0} + \frac{\text{حـ}}{٢} \times \frac{\text{ع} - \text{ع}_{0}}{\text{حـ}}\right)$

$$\text{ف} = \left(\frac{\text{ع} - \text{ع}_{0}}{\text{حـ}}\right)\left(\frac{\text{ع} + \text{ع}_{0}}{٢}\right)$$

$$\therefore ٢\,\text{حـ}\,\text{ف} = \text{ع}^{2} - \text{ع}_{0}^{2}$$

$$\text{أو} \quad \text{ع}^{2} = \text{ع}_{0}^{2} + ٢\,\text{حـ}\,\text{ف} \quad \ldots \quad (٣ - ٣)$$

المعادلات ٣–١ ، ٣–٢ ، ٣–٣ تصف متغيرات الفضاء لجسيم خاضع لعجلة منتظمة. والإجراء الذى اتبعناه فى الحصول على هذه المعادلات إجراء شائع فى علم الفيزياء ، ويسمى بالاشتقاق . والاشتقاق عموماً يؤدى إلى جمع الفروض وتلخيصها بدقة رياضية ، مصحوبة بالتعريفات المتفق عليها . وتتلخص فائدة هذه الطريقة فى إبراز وجهة نظر جديدة يراد تمثيلها ، وفى النتائج التى قد تظهرها وتوضحها ، وفى توفير الجهد المبذول فى الحسابات الكمية .

واشتقاق معادلات الحركة الخطية المنتظمة ، التى فرغنا الآن من إكمالها هى أولى اشتقاقات كثيرة سوف نصادفها فى هذا الكتاب ، وحيث إنها توضح الإجراء العام المتبع . فإننا سوف نعيد النظر فى الخطوات التى سرنا فيها .

التعاريف المستخدمة : العجلة ، متوسط السرعة (صيغتان) .

الفروض الموضوعة : الحركة خطية ، العجلة منتظمة ، السرعة الابتدائية والعجلة معروفتان ، أما الإزاحة — أو الزمن — أو السرعة النهائية فغير معروفة .

نتيجة الاشتقاق :

$$\text{ع} = \text{ع}_{\cdot} + \text{حـ}\,\text{ن} \qquad \text{(٣ — ١)}$$

$$\text{ف} = \text{ع}_{\cdot}\,\text{ن} + \tfrac{1}{2}\,\text{حـ}\,\text{ن}^{2} \qquad \text{(٣ — ٢)}$$

$$\text{ع}^{2} = \text{ع}_{\cdot}^{2} + 2\,\text{حـ}\,\text{ف} \qquad \text{(٣ — ٣)}$$

وقد تفيد المحاولة فى تسهيل العمليات الحسابية إذا بدئ فى قياس الزمن فى اللحظة التى يبدأ الجسيم فيها الحركة من وضع السكون ، فى هذه الحالة ع. = ٠ وتأخذ المعادلات الصيغ البسيطة الآتية :

$$\text{ع} = \text{حـ}\,\text{ن} \qquad \text{(٣ — ٤)}$$

$$(\text{ع}_{\cdot} = 0)\text{،}\quad \text{ف} = \tfrac{1}{2}\,\text{حـ}\,\text{ن}^{2} \qquad \text{(٣ — ٥)}$$

$$\text{ع}^{2} = 2\,\text{حـ}\,\text{ف} \qquad \text{(٣ — ٦)}$$

وكما سبق التنويه ، فإن إحدى الفوائد التى نجنيها من هذا الاشتقاق تتلخص

فى إمكان الحصول على نتائج تتعلق بالحركة المعجلة المنتظمة لم تكن واضحة من قبل . فالمعادلة (٣ — ٤) تدل على أن السرعة تتناسب طردياً مع الزمن ، والمعادلة (٣ — ٥) تدل على أن المسافة تزداد مع مربع الزمن . . أى أن الجسم يقطع فى مدة ثانيتين أربعة أمثال المسافة التى يقطعها فى الثانية الأولى منهما ، وفى مدة ثلاث ثوانى يقطع ٩ أمثالها ، وفى مدة ٤ ثوان يقطع مسافة قدرها ١٦ مرة وهكذا . وأخيراً تدل المعادلة (٣ — ٦) على أن السرعة اللحظية تتناسب مع الجذر التربيعى للإزاحة ، بمعنى أن الجسم فى نهاية ٤ سم تكون سرعته قدر سرعته فى نهاية السنتيمتر الأول مرتين ، وفى نهاية ٩ سم تكون سرعته ٣ مرات وهكذا . ومن المؤكد أنه من غير المرغوب فيه حفظ هذه العلاقات كتفاصيل تتعلق بالحركة المعجلة . حقيقة أنها قد تكون مفيدة أحياناً ، ولكن المهم أن هذه المعادلات تحتوى فى ثلاثة أسطر على ما يكافئ صفحات طويلة من الوصف وتسمح لنا فى الوقت نفسه بعمل الحسابات الكمية .

مثال ١ : لنفرض جسيماً مقيداً بالحركة فى خط مستقيم ، وأن عجلته ١٠٠ سم / ث^{٢}
ما هى المسافة التى يقطعها بعد ٣ ثوان منذ بدء الحركة من وضع السكون ؟

المعلومات المعطاة : حـ = ١٠٠ سم / ث^{٢} ، ع. = ٠ ، ɔ = ٣ ثوان

الحل : المعادلة ٣ — ٢ : ف = ع. ɔ + $\frac{١}{٢}$ حـ ɔ^{٢}

= ٠ + $\frac{١}{٢}$ × ١٠٠ × ٣^{٢}

= ٤٥٠ سم (الجواب)

ما هى السرعة بعد ٣ ثوان ؟

المعلومات : ع = ؟

الحل : المعادلة ٣ — ١ : ع = ع. + حـ ɔ

= ٠ + ١٠٠ × ٣ = ٣٠٠ سم / ث (الجواب)

ما هى السرعة بعد قطع مسافة ٨٠٠ سم ؟

المعلومات : ع = ؟ ، ف = ٨٠٠ سم

الحل : المعادلة ٣ — ٣ : $ع^{٢} = ع_{٠}^{٢} + ٢ \, ح \, ف$

$= ٠ + ٢ \times ١٠٠ \times ٨٠٠$

$ع = \sqrt{١٠٠ \times ١٦٠٠} = ١٠ \times ٤٠ = ٤٠٠$ سم/ث

(الجواب)

ما هو الزمن اللازم لقطع ٨٠٠ سم ؟

المعلومات : ن = ؟ ، ف = ٨٠٠ سم

الحل : المعادلة ٣ — ٢ : $ف = ع_{٠} \, ن + \frac{١}{٢} \, ح \, ن^{٢}$

$٨٠٠ = ٠ + \frac{١}{٢} \times ١٠٠ \, ن^{٢}$

$ن^{٢} = ١٦$

$ن = ٤$ ثانية (الجواب)

مثال ٢ : لنعكس الوضع فى المثال السابق . افرض أنه فى لحظة بدء قياس الزمن كان للجسيم سرعة ٢٠٠ سم / ث ، وأنه يعانى عجلة تقصير (عجلة سالبة) مقدارها ١٠٠ سم / ث^{٢} . متى يصل الجسم إلى وضع السكون ؟

المعلومات : $ع_{٠} = ٢٠٠$ سم/ث ، ح = — ١٠٠ سم / ث^{٢} ، ع = ٠ ن = ؟

الحل : المعادلة ٣ — ١ : $ع = ع_{٠} + ح \, ن$

$= ٢٠٠ + (—١٠٠) \times ن = ٠ \therefore ن = ٢$ ثانية (الجواب)

ما هى المسافة التى قطعها الجسيم فى هذا الوقت ؟

المعلومات : = ٢ ثانية ، ف = ؟

الحل : المعادلة ٣ — ٢ : $ف = ع_{٠} \, ن + \frac{١}{٢} \, ح \, ن^{٢}$

$= ٢٠٠ \times ٢ + \frac{١}{٢} (—١٠٠) \times ٢^{٢}$

$= ٤٠٠ — ٢٠٠ = ٢٠٠$ سم (الجواب)

وقد يكون من المفيد عند هذه المرحلة ، أن نوضح إشارة لفتنا النظر إليها سابقاً عن فائدة التمسك بنظام معين للوحدات مثل نظام س . ج . ث . فى التمارين

التي أجريناها كانت العجلة فعلا ١ متر / ث^{٢}. إذا استخدمنا للعجلة قيمتها المذكورة الآن هي ١ بدلا من ١٠٠ ، فمن الواضح أن النتيجة التي نصل إليها تكون مختلفة . ومن الصعب عندئذ أن نربط الجواب بأي وحدة معروفة . ومن الممكن مراجعة صحة الوحدات بكتابة معادلة الوحدات . مثال ذلك

المعادلة :

$$ف = ع_. ن + \frac{١}{٢} ح ن^{٢}$$

معادلة الوحدات :

$$\text{وحدة } ف = \frac{سم}{ث} \times ث + \frac{سم}{ث^{٢}} \times ث^{٢} = سم$$

وإذا وضعنا للعجلة قيمتها الجديدة وهي ١ متر / ث^{٢} :

$$\text{فإن وحدة } ف = \frac{سم}{ث} \times ث + \frac{متر}{ث^{٢}} \times ث^{٢}$$

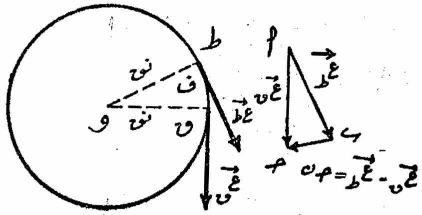
$$= سم + متر = ؟$$

لذا فإننا إذا تمسكنا بوحدات ثابتة مثل الموجودة في نظام س . ج . ث . فمن المؤكد أننا نصل إلى نتيجة تكون الوحدات المذكورة . أما إذا استخدمنا وحدات أخرى ولو مشتقة من النظام المذكور فقد لا نصل إلى شيء يمكن التعبير عنه .

٣ ــ ٧ الحركة الدائرية المنتظمة :

بالرجوع إلى بند ٣ ــ ٤ ، نجد أن الطريقة الأخرى لتغيير السرعة كانت تشير إلى تغيير الاتجاه . إذا حفظنا قيمة السرعة (وهي الانطلاق) ثابتة ، وغيرنا الاتجاه بانتظام ، فلا بد أن توجد عجلة ثابتة في المقدار . مثل هذا التغير المنتظم في الاتجاه ينشأ عند حركة جسيم في دائرة بانطلاق ثابت ، تسمى هذه الحركة بالحركة الدائرية المنتظمة . ويمكن اشتقاق العجلة التي تصاحب الحركة الدائرية المنتظمة من اعتبارات تتعلق بشكل ٣ ــ ٢ حيث تبين الدائرة المرسومة مسار جسيم

متحرك ، وقد اخترنا النقطتين ط ، ق على المسار . عند أية نقطة منهما تكون السرعة مماسة للدائرة وثابتة القيمة ،



(شكل ٣ – ٢)

$$\text{ع}_{\text{ط}} = \text{ع}_{\text{ق}} = \text{ع} = \frac{\text{ف}}{\text{ن}}$$

حيث ن الفترة الزمنية التى تستغرقها النقطة للتحرك من ط إلى ق . ولو أن قيمتى $\vec{\text{ع}}_{\text{ط}}$ ، $\vec{\text{ع}}_{\text{ق}}$ واحدة إلا أن اتجاههما مختلف . الفرق بين $\vec{\text{ع}}_{\text{ط}}$ ، $\vec{\text{ع}}_{\text{ق}}$ مقسوماً على الزمن ن يعطينا العجلة ، ولو أن الفرق المذكور هو فرق فى الاتجاه فقط . والعجلة مضروبة فى الزمن ، حـ ن ، هى الضلع المكمل لمثلث السرعات (شكل ٣ – ٢) . إن طريقة رسم المتجهات للسرعات تبين أن التغير المتجه للسرعة وهو حـ ن يشير إلى مركز الدائرة ، بفرض أن ط ، ق قريبتان من بعضهما البعض جدا . وباعتبار أن ط ق مستقيم تقريباً فإن المثلثين ا ب حـ ، و ط ق متشابهان . الأول منهما مثلث السرعات والثانى مثلث للمسافات (أضلاعه نق ، نق ، ف) ولذا فإن :

$$\frac{\text{حـ ن}}{\text{ع}} = \frac{\text{ف}}{\text{نق}}$$

أو $$\text{حـ} = \frac{\text{ع}}{\text{نق}} \times \frac{\text{ف}}{\text{ن}}$$

وبما أن الانطلاق منتظم فإن $\frac{\text{ف}}{\text{ن}} = \text{ع}$ ، ونحصل على

$$\text{حـ} = \frac{\text{ع}^{2}}{\text{نق}} \qquad \text{. . . . .} \qquad (\text{٣ – ٧})$$

لذا فإن العجلة اللحظية تتجه من موضع الجسيم إلى مركز الدائرة وتعطى المعادلة ٣ – ٧ قيمتها. وتعرف هذه العجلة المتجهة إلى المركز دائماً بالعجلة المركزية الجاذبة. لاحظ أن قيمتها ثابتة ، ولكن اتجاهها يتغير باستمرار ليشير من موضع الجسيم إلى مركز الدائرة باستمرار .

مثال ١ : إذا تحرك جسم معين على دائرة قطرها متران ، وكان له انطلاق منتظم قدره ٥٠ سم / ث ، ما هى عجلة هذا الجسم ؟ ما اتجاه هذه العجلة ؟

المعلومات : القطر = ٢ متر = ٢٠٠ سم ، نصف القطر = ١٠٠سم = نق

ع = ٥٠ سم \ث

حـ = ؟

الحل : المعادلة ٣ ــ ٧ : $حـ = \frac{ع^٢}{نق}$

$$= \frac{(٥٠)^٢}{١٠٠} = \frac{٢٥٠٠}{١٠٠}$$

$$= ٢٥ \text{ سم / ث}^٢$$

وهذه العجلة متجهة إلى المركز كمثل جميع العجلات المركزية الجاذبة(الجواب)

لاحظ أنه كان من الضرورى تغيير وحدة القطر إلى وحدة من وحدات س . حـ . ث . وللتأكد من أن هذا الإجراء يعطى وحدة معترفاً بها للعجلة حـ ، اكتب معادلة الوحدات :

$$حـ = \frac{ع^٢}{نق}$$

$$\text{وحدة } حـ = (\frac{سم}{ث})^٢ \times \frac{١}{سم} = \text{سم / ث}^٢$$

مثال ٢ : « بلية » تدور فى لعبة الروليت فى دائرة فتعمل ٣٠ دورة / دقيقة. إذا كان نصف قطر الدائرة ٢٥ سم ، ما قيمة العجلة المركزية الجاذبة « للبلية»

المعلومات : نق ٢٥ سم ، ع = ٣٠ دورة / دقيقة .

حـ = ؟

الحل : من الواضح أن ع ليست معطاة بوحدة س . ج . ث حيث إنه لا الدورة ولا الدقيقة من وحدات س . ج . ث . ولكننا نصل إلى الوحدة المرغوبة بتذكر أن محيط الدائرة هو ٢ ط × نصف القطر . إذن فى دورة واحدة تقطع البلية ٢ ط × ٢٥ سم (أو) ٥٠ ط سم ، وفى ٣٠ دورة

تكون المسافة ٣٠ × ٥٠ ط = ١٥٠٠ ط سم ، وهذه تحتاج إلى ٦٠ ثانية

لذا فإن السرعة تساوى $\frac{١٥٠٠ ط}{٦٠}$ = ٢٥ ط سم / ث = ع

$$ح = \frac{ع^٢}{نق}$$

$$= \frac{(٢٥ ط)^٢}{٢٥} = ٢٥ ط^٢ = ٢٤٦ سم / ث^٢$$ (الجواب)

تمارين

١ — سيارة تقطع ١٠ كم بانطلاق منتظم قدرة ٥٠ كم/ الساعة ثم تعجل سرعتها إلى ٨٠ كم / الساعة ، وتستمر بالانطلاق الجديد لمسافة ٢٠ كم . بإهمال الزمن الصغير اللازم لتغير الانطلاق ، احسب الانطلاق المتوسط فى قطع المسافة الكلية أى ٣٠ كم .

الجواب : ٦٦,٦ كم / الساعة

٢ — قطار يبدأ بانطلاق قدره ٢٠كم / الساعة ، يعجل بانتظام إلى انطلاق قدره ١٠٠ كم / الساعة . ما هو الانطلاق المتوسط أثناء هذه المدة ؟

الجواب : ٦٠ كم / الساعة

٣ — يعانى جسيم عجلة خطية مقدارها ٢٠ سم / ث^٢. إذا ابتدأ هذا الجسيم من السكون ، فما سرعته بعد دقيقتين ؟ وما هى المسافة المقطوعة ؟

الجواب : ٢٤ م / ث ، ١,٤٤ كم

٤ — يعجل جسم بانتظام من حالة السكون فيصل إلى سرعة قدرها ١٠ م / ث ، بينما يكون قد قطع مسافة ٢٠٠٠ سم . ما هى عجلته ؟ وما هو الزمن الذى استغرقته هذه الحركة ؟

الجواب : ٢٥٠ سم / ث٢، ٤ ثوان

٥ — جسيم يعجل بانتظام من وضع السكون فيصل إلى سرعة ٦ م / ث فى مدة دقيقة . ما هى المسافة التى يقطعها ليصل إلى هذه السرعة ؟ وماذا

كانت سرعته عند نهاية نصف الدقيقة الأولى ؟ وماذا كانت سرعته فى اللحظة التى قطع فيها نصف المسافة الكلية ؟

الجواب: ١٨٠ م ، ٣ م / ث ، ٤,٢٥ م / ث

٦ ــ جسم يسير بسرعة ١٠ م / ث وتبطؤ حركته بانتظام فيسكن بعد أن يقطع مسافة ٢٠ م . ما هى عجلة تقصيره ؟ وما هى المدة التى يستغرقها الجسم ليصل إلى وضع السكون ؟

الجواب : ٢٥٠ سم / ث^{٢} ، ٤ ثوان

٧ ــ إناء دوار (سنتريفيوچ) نصف قطره ٥٠ سم يعمل ١٠٠ دورة / ث . ما هى العجلة المركزية الجاذبية لجسم على محيط هذا الإناء ؟

الجواب : ١,٩٧ × ١٠^{٧} سم/ ث ^{٢}

٨ ــ قطر الأرض عند خط الاستواء ٦,٣ × ١٠^{٦} م . ما هى العجلة المركزية الجاذبة لجسم عند خط الاستواء ؟

الجواب : ١,٦٦ سم / ث^{٢}

ملحوظة : هذه العجلة صغيرة وهى نحو $\frac{١}{٦٠٠}$ من عجلة الجاذبية المتجهة نحو المركز نفسه .

مراجع مقترحة للاطلاع

Dampier, Sir William, "A History of Science" New York, The Macmillan Co., 1946.

ورد بالصفحات ١٤١ – ٤٧ عرض شامل لماوصل إليه جاليليو فى علم الديناميكا.

Galileo, "Two New Siences", New York, The Macmillan Co., 1914.

الصفحات من ١٥٤ إلى ٢٤٣ هى ترجمة لما سبق أن نشره جاليليو من بحوثه الأصلية عن طبيعة السرعة والعجلة فى علم الديناميكا .

Horzanyi, Zoolt, "The Star Gazer", New York, G.P. Putman & Son, 1939.

سرد لتاريخ حياة جاليليو بطريقة روائية جذابة .

Mott-Smith, M., "This Mathematical World", New York, A. Appleton & Co., 1931.

تبحث الأبواب ٦ – ٧ – ٨ رياضة جاليليو والدور الذى تلعبه العجلة ، وهو سهل التتبع .

Moulton, F.R. and Schiffers S.J., "The Autobiography of Science", New York, Dubleday Doran & Co., 1945.

مقتطفات مما كتبه دافنشى وجاليليو ونيوتن .

الفصل الرابع

ديناميكا الجسيمات ـ الكتلة والقوة

٤ ـ ١ نشوء علم الديناميكا :

لقد نشأ أول فهم حقيقى لحركة الأجسام ، فى القرن السادس عشر . ويرجع معظم الفضل فى أولى المحاولات التى عملت ، إلى « جاليليو» الذى خرج على الأفكار السائدة فى عصره ، وكرس حياته لابتكار التجارب وتعليلها ، فتوصل إلى فهم حقيقى لطبيعة الحركة . ولم يكن « جاليليو » المنفرد الوحيد فى هذا الموضوع بل قد سبقه بعض العمل الإنشائى فى القرن السابق لحركته . فإن ليوناردودا فينشى "Leonardo da Vinci" الذى لم تنشر مذكراته فى عصره ، كان على فهم بطبيعة حركة الأجسام الساقطة ، ولقد ذكر بندتى "Benedetti" أنحركة الأجسام الساقطة خاضعة لعجلة ، وإنما تجب الإشارة إلى أن « جاليليو» هو الذى فهم الدور الرئيسى الذى تلعبه العجلة فى جميع الحركات الديناميكية ، وهو الذى وضع علم الديناميكا فى مجراه الحديث على هيئة تعميم شامل من التجربة .

ومعظم البحوث الأولى فى علم الديناميكا كانت تتعلق بحركة الأجسام الساقطة ، إذ أن حركة هذه الاجسام هى أبسط الحركات الممكن مشاهدتها بسهولة . وفى عصر « جاليليو » كانت البحوث متأثرة بآراء «أرسطو» الذى كان يعتقد أن لكل جسم وضعه الطبيعى ، فالأجسام الثقيلة مكانها تحت ، والأجسام الخفيفة مكانها فوق ، ولذا كان من الطبيعى أن تسقط الأجسام الثقيلة لتبحث عن المكان الخاص بها . وزيادة على ذلك ، فقد كان مما يتفق مع هذه الاتجاهات الطبيعية أن تسقط الأجسام الثقيلة بسرعة أكبر من التى تسقط بها الأجسام الخفيفة . . هذه هى رغبة الطبيعة . أما الآراء الخاصة بالحركات الأكثر تعقيداً ، فقد بعدت عن اتجاه التفكير العلمى الحديث ، فالقذائف مثلا كان يظن أنها تعنى حركات

خارجة عن المألوف بمساعدة الهواء ، وهكذا لم تكن هناك محاولات لإعطاء وصف كمى ، أو لترجمة ما هو حادث فعلا .

وتجارب « جاليليو » الكثيرة المتصفة بالحذق هى التى شطرت هذه الآراء كما هو معروف . فإن تجربته على سقوط الأجسام من برج « بيزا » المائل قد فندت الرأى القائل ، بأن الأجسام الثقيلة تسقط بسرعة أكبر من الأجسام الخفيفة . وتجاربه عن حركة الأجسام على المستوى المائل ، والتى بذل فى إجرائها أكبر عناية ، قد بينت الظروف الحقيقية التى تؤثر فى سرعة الأجسام الساقطة وتحددها . والنقطة الهامة التى توصل إليها كانت : إن سرعات الأجسام الساقطة تزيد بمرور الزمن وبطول المسافة المقطوعة . فعلى أية هيئة يحدث هذا ؟ وما هى العلاقة بين الزمن والمسافة ؟ وبتحليل تجاربه ، توصل « جاليليو » إلى أن الصفة الرئيسية المشتركة فى جميع حركات السقوط هى العجلة . فلابد أن هناك خاصية من خصائص الطبيعة تجعل الأجسام الساقطة تتحرك بعجلة ثابتة ، وهذه العجلة غير خاضعة لحجم الجسم أو شكله أو كتلته . هذه العجلة العمومية هى التى تحدد وحدها صفة الحركة ، أما السرعات والمسافات فهى نتائج ثانوية لها تنشأ بطبعها عند ما تتقدم الحركة بمرور الزمن . إن التحقق من أن العجلة هى اللب فى حركة السقوط قد مكنها من أن تصبح قلب الديناميكا النابض . كما أن محاولات « جاليليو » قد أعطت للباحثين نقطة البداية الثابتة التى انطلقوا منها لاستكمال الدراسة .

٤ – ٢ قوانين الحركة لنيوتن :

بين « جاليليو » طريق التقدم فى العلم بأن ترك جانباً الآراء غير المبينة على المشاهدة، وأصر على التحقق من الفروض بإجراء التجارب المباشرة. واتجاه سيره فى هذا الخط يضرب المثل لما ذكرناه فى الباب الأول عن التجارب وقوانين الفيزياء. على أن عبقرية « جاليليو » لم تمتد إلى ما يسمى بالنظرية الفيزيائية ، فلا يوجد ثمة افتراض ذهنى يتمشى مع بناء الديناميكا الجاليلية . وقد ترك هذا الأمر « لنيوتن » فحققه فى القرن السابع عشر .

لخص « نيوتن » علم الحركة وأكمله فى ثلاثة قوانين تربط السرعة والعجلة بالخاصية الأساسية التى تتبع كل جسم مادى وهى كتلته . هذه القوانين هى أسس الديناميكا العادية ، وهى فى الوقت نفسه عبارة عن تعاريف أولية وفروض واستنتاجات نظرية كلها مجتمعة فى إطار واحد . وقد أضفنا كلمة « عادية » إلى الميكانيكا لنشير بذلك إلى خروج بسيط ولكنه هام على نظرية « نيوتن » ظهر فى مستهل القرن الحالى . وقد تولت النظرية النسبية الرد على هذا الخروج وأفهمتنا ماهيته . إن الديناميكا النسبية تختلف عن نظرية نيوتن فقط فى الحالات التى تتضمن سرعات كبيرة أو تمتد إلى مسافات شاسعة .

وبما أن وصف الحركة يحتاج إلى نظام إحداثى فمن الضرورى أن نستقر على نظام الإحداثيات ، الذى يجب اختياره من بين النظم الممكنة لتدوين قوانين الحركة وهذه مسألة تحتاج إلى نظر . فإن النظام المناسب لمناقشة الحركة بلغة بسيطة هو النظام المتصل بالنجوم الثابتة . وهى نجوم بعيدة بعداً كبيراً لا يسمح بأن يكون لحركة الأرض فى مدارها أى تأثير على أوضاعها النسبية . يسمى نظام الإحداثيات هذا بالنظام القصورى ، وقوانين نيوتن تتعلق بهذا النظام . على أن هذا النظام ليس هو بالنظام القصورى الوحيد. فإن أى نظام للإحداثيات لا يكون متحركاً بعجلة هو بالنسبة للنجوم الثابتة يمكن اعتباره نظاماً قصورياً أيضاً . ولمعظم الأغراض تعتبر عجلة الأرض بالنسبة إلى هذه النجوم صغيرة لدرجة تمكننا من اعتبار الأرض كأنها نظام قصورى للتجارب الأرضية .

وصياغة قوانين الحركة التى تجعلها صالحة لأى نظام قصورى تتلخص فيما يأتى :

القانون الأول : كل جسم غير متأثر بقوى خارجية يظل ساكناً أو يتحرك بسرعة ثابتة .

القانون الثانى : إن محصلة القوة المؤثرة على جسم هى حاصل ضرب كتلته وعجلته .

القانون الثالث : إذا أثر جسمان بقوة أحدهما على الآخر ، فإن قوه الأول على الثانى تساوى فى المقدار وتضاد فى الاتجاه قوة الثانى على الأول .

نرى من ذلك ، أن هذه القوانين تتضمن مفاهيم عن الجسيم والسرعة والعجلة والكتلة والقوة ، والكميتان الأخيرتان منهما لم يسبق تعريفهما . وقد يعترض البعض على هذا الإجراء ويحتم أن تسبق التعاريف الصياغة . والجواب على ذلك أن الكتلة والقوة لا يمكن تعريف إحداهما مستقلة عن الأخرى ، والواقع أن علاقتهما الأساسية متضمنة فى هذه القوانين . ومن وجهة النظر هذه لا يمكن اعتبار قوانين « نيوتن » من القوانين التى يتوصل إليها بطريقة وضعية لتحديد العلاقة بين المشاهدات ولكنها تعاريف للمفاهيم الأساسية فى علم الديناميكا .

٤ – ٣ قانون الحركة الأول لنيوتن :

إن استخلاص المعنى الكامل لهذه القوانين الى تبدو بسيطة ظاهريا ، يحتاج إلى بصيرة نفاذة . لنحلل القانون الأول . يتضح لأول وهلة أنه يؤسس إنكاراً مباشراً لاراء « أرسطو » عن وضع السكون « الطبيعى » للأجسام . فهو ينص على أن الحركة بسرعة ثابتة هو أمر « طبيعى » أيضاً . إن القانون الأول يشير ببساطة إلى أن الأجسام تستمر فى حركتها المنتظمة إلا إذا منعت عن ذلك بوساطة قوة خارجية (وفى هذه الحالة يعتبر وضع السكون أو الحركة بسرعة تساوى صفراً ، حالة خاصة من السرعة المنتظمة) ومما يجب التنويه عنه هو أن القانون الأول لا يفسر خاصية الاستمرار فى الحركة (ومن ضمنها وضع السكون) وبمعنى آخر أنه لا يبين لماذا يحدث هذا ، إنه يحتوى فقط – على وجه الشمول – على نتائج المشاهدات التى عملها كل من جاليليو ونيوتن والتى تبين أن هذا يحدث فعلا . ويطلق اسم القصور الذاتى على خاصية المادة التى تؤدى بها إلى مقاومة التغير فى حركتها . ومن السهل الالتجاء إلى حاستنا الداخلية لتصوير هذه الخاصية القصورية للأجسام المادية .

من المشاهدات المعتادة أننا نحتاج فى إيقاف عربة ركوب خفيفة إلى مجهود

أقل مما نحتاج إليه لإيقاف عربة قطار من ذات العشرة الأطنان مثلا . تتميز الأخيرة بإصرار أكبر على الاحتفاظ بحركتها . . أى أن قصورها الذاتى أكبر . ولذا يدل تصويرنا الداخلى على أن القصور يكون مصحوباً بكتلة . وبصرف النظر عن كون القصور صغيراً أو كبيراً ، فإن القانون الأول ينص على أن كلا الجسمين لا يقف إلا إذا أثرت عليه قوة خارجية . وحيث إننا لا نشاهد فعلا أجساماً متحركة بانتظام على أرضنا فلابد أن نفرض — إذا تمسكنا بالقانون الأول — أن هناك قوة خارجية موجودة بصفة دائمة تمنع الحركة المنتظمة . وهذه القوة هى الاحتكاك الذى يمد الأجسام دائماً بقوة معطلة تمنعنا من مشاهدتها متحركة باستمرار خالية من جميع القوى الخارجية المضادة .

٤ — ٤ قانون الحركة الثانى لينوتن :

ينص هذا القانون على أن :

القوة = الكتلة × العجلة

أو $\overrightarrow{ق} = ك\ \overrightarrow{حـ}$

لاحظ أن القوة كمية موجهة ، ولذا فإن ق تكون فى العادة ، المحصلة الناشئة من إضافة جميع القوى المؤثرة على ك إضافة موجهة . إن هذه المحصلة أو القوة غير المتوازنة هى التى تعطى ك عجلة . واتجاه العجلة هو اتجاه القوة المحصلة نفسه — حسب القانون الثانى — وإذا فرضنا ، كما يجب أن نفرض دائماً ، أن الكتلة ما هى إلا تصوير ذهنى من الصعب تعريفه ، فإن القانون الثانى لنيوتن يمدنا بطريقة فعالة لتعريف القوة : القوة هى الكمية التى تعطى الكتلة عجلة وتساوى حاصل ضرب الكتلة والعجلة ، ولذا فإن القانون الثانى يمكن اعتباره تعريفاً أكثر منه قانوناً للطبيعة .

وحدة القوة : يمكن الوصول إلى وحدة س . ج . ث. للقوة بالكيفية المعتادة ، بإمداد الكميات الداخلة فى تعريفها بوحداتها فهى جرام . سم فى الثانية فى الثانية (جم^{٢} . سم / ث^{٢}) . وبما أننا نصادف القوة على مقياس متسع فى الفيزياء ، فإن

لوحدتها اسما خاصاً تعرف به . هذه الوحدة هى « الداين » وهى لا تخرج عن كونها ١ جم . سم/ث٢ . أى أن الداين هو القوة التى تعطى كتلة مقدارها ١ جم عجلة قدرها ١ سم فى الثانية لكل ثانية .

مفهوم التوازن : طالما أن هناك محصلة قوى تؤثر على جسيم أو نظام من الجسيمات فإن القانون الثانى يتطلب وجود عجلة للجسيم أو النظام المذكور . لذا فإن أى نظام تكون محصلة القوى عليه صفراً ، لابد وأن تكون عجلته صفراً أيضاً ، وبمعنى آخر تكون سرعته ثابتة . مثل هذا النظام يكون فى حالة توازن . فمثلا جميع النظم القصورية لابد وأن تكون نظم توازن ، لأن النظام القصورى خال من العجلة حسب التعريف . لاحظ جيداً أن التوازن لا يعنى أن تكون الحركة صفراً ، بل أن يكون التغير فى الحركة هو الصفر . وفى هذا الضوء الجديد من الفكر يصف القانون الأول ببساطة حركة الجسم الموجود فى حالة توازن . بينما يصف القانون الثانى الحركة عندما يختل التوازن . من هذه الوجهة يعتبر القانون الأول « لنيوتن » حالة خاصة من قانونه الثانى .

٤ – ٥ قانون الحركة الثالث لنيوتن :

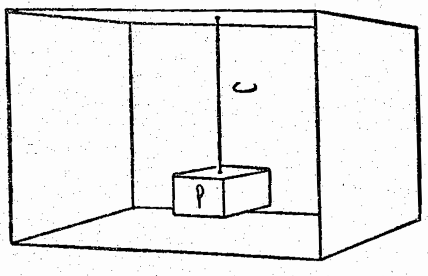
يكتب القانون الثالث غالباً بالصيغة الآتية : « لكل فعل (أى قوة) رد فعل مساو فى المقدار ومضاد فى الاتجاه » . ومن السهل التمسك بحرفية هذا النص بحيث يفوت علينا إدراك مغزاه الكبير . وليس من الحكمة التقليل من شأن هذا القانون باعتباره من القوانين الكبيرة الوضوح التى لا تحتاج إلى تعليق . بل على العكس إنه قد احتاج من عالم مثل نيوتن النفاذ بكل بصره ليقومه التقويم الصحيح . إن القوى لابد أن توجد مزدوجة ولا تنشأ مفردة أبداً ، على أن هذه الأزواج من القوى لا تؤثر على الجسم نفسه وهذا هو لب الموضوع . هناك جسم مؤثر وجسم مؤثر عليه ، وتؤثر قوة الفعل على الجسم المؤثر عليه ، أما قوة رد الفعل فتؤثر على الجسم الأصلى . لذلك لا يمكن استخدام طريقة الموجهات لإضافة الفعل إلى رد الفعل .

فالكتاب المرتكز على نضد يؤثر على سطح النضد بقوة إلى أسفل هى وزنه

ويدل القانون الثالث ، على أن سطح المنضدة يؤثر بقوة مساوية ومضادة — أى إلى أعلى — على الكتاب . وإذا استندت إلى قائم مصباح الشارع مؤثراً عليه بقوة عرضية ، فإن قائم المصباح يرتكز أيضاً عليك ، ويؤثر بنفس القوة العرضية ، ولكن فى الاتجاه المضاد . إن حذاء الشخص الماشى يدفع الأرض إلى الوراء ، رد فعل هذه القوة يدفع الشخص إلى الأمام . إن قوة الاحتكاك بين الحذاء والأرض هى التى تمكن الشخص من دفع الأرض إلى الخلف ، وإذا وضع الشخص على أرض منبسطة من الجليد العديم الاحتكاك ، فإنه لا يستطيع أن يضغط عليه إلى الخلف ، بالتالى يعجز عن دفع نفسه إلى الأمام . وإذا أمسكت الظروف شخصاً فى هذا الوضع العجيب (وسنترك جانباً موضوع كيف أوجد نفسه على الجليد) فما عليه إذا أراد أن يتصرف بعقل ، إلا أن يقذف بجميع محتويات جيوبه بقوة لأن كل دفعة قوية يعطيها ذراعه لأى كتلة يكون لها رد فعل على جسمه . فإذا كان يحمل الكثير فى جيوبه واستمر يفعل ذلك ، فقد يتغلب بهذه الطريقة البدائية فى علم النفاثات على موقفه الحرج ويتحرك . من الواضح ، إذن أن عالماً لايوجد به احتكاك يكون من الصعب المعيشة فيه .

٤ — ٦ طريقة عزل نظام أو فصله :

استخدمنا كثيراً كلمة نظام ، والمقصود بها الأجسام المادية التى يتركز عليها اهتمامنا . من الواضح أن فكرة النظام مرنة ومتسعة ، ولكى نكسبها معنى لابد من العناية بحدود النظام . وعملية تركيز اهتمامنا تسمى بعملية عزل النظام أو فصله . ولتصوير الموقف اعتبر شكل ٤ — ١ الذى فيه كتلة معلقة ا من سقف غرفة بواسطة خيط ب . ونتساءل الآن ما هى القوى المؤثرة ؟ ولكى نكسب هذا السؤال معنى ، لابد من إعادة صياغتة ليقرأ هكذا : فى نظام معين (يحدد فيما بعد)



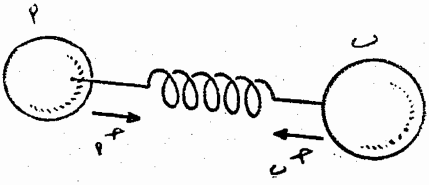
(شكل ٤ — ١)

أى القوى يمكن اعتبارها مؤثرة ؟ لنعتبر النظام الذى أمامنا هو الكتلة ا نفسها ، ونعزل هذا النظام بإهمال جميع القوى غير المؤثرة على ا . فالجواب عندئذ أن هناك قوتين تؤثران على هذا النظام هما : وزن ا (قوة جاذبية) ويؤثر إلى أسفل ، وشد من الخيط عليه إلى أعلى . وإذا فرضنا أن الكتلة فى حالة سكون (أى يكون فى حالة توازن) ، فإن هاتين القوتين تكونان متساويتين ومتضادتين ، أى يكون مجموعهما صفراً .

وإذا مددنا النظام بحيث يشمل الكتلة ا والخيط ب ، فإن القوى المؤثرة هى : قوة الجاذبية على ا ، وقوة شد الخيط إلى أعلى على ا ، ورد الفعل بالقانون الثالث لهذه القوة الأخيرة على ب ، وأخيراً قوة شد السقف إلى أعلى المؤثرة على ب (ونهمل تأثير قوة الجاذبية على الخيط نفسه) ، ومن الجلى أننا إذا مددنا النظام أكثر من هذا ، فلابد أن يشمل القوة السفلى المؤثرة على السقف ، وقوة ارتكاز السقف على الحوائط الجانبية ، وقوة ارتكاز هذه على الأرضية المرتكزة بدورها على الأرض وهكذا . . وإذا اعتبرنا الأرض بأكملها نظاماً ، فلابد أن ندخل فى اعتبارنا تأثير جاذبية كل من الشمس والقمر عليها . والعالم بأكمله هو أوسع نظام يمكن فصله ، وهذه هى مهمة عالم الفلك المشتغل على نظام كونى . إن معالجتنا لأى موضوع تكون أبسط كلما ضيقنا النظام المعتبر .

٤ — ٧ ترجمة لمعنى الكتلة :

بينما لا يوجد تعريف للكتلة أو القوةمستقل أحدهما عن الآخر ، فإن أرنست ماخ « Ernest Mach » فى أواخر القرن التاسع عشر ، قد حاول ترجمة الكتلة بمدلولات قوانين الحركة . ومما يجب أن نلفت النظر إليه أنه لا « نيوتن » ولا من سبقه من المشتغلين بالديناميكا ، قد تعرضوا لبحث الكتلة من وجهة النظر الحديثة هذه . فقد وصفوها بأنها كمية المادة الموجودة فى الجسم ، وهذه حلقة مفرغة لأن تعريف المادة ليس أسهل من



(شكل ٤ — ٢)

الكتلة . أما « ماخ » فقد ترجم الكتلة عن طريق التأثير المتبادل بين جسمين وبتطبيق القانون الثالث للحركة .

وسوف نجمل رأى « ماخ » باختصار كما يأتى : اعتبر جسمين يؤثر أحدهما على الآخر ا ، ب (شكل ٤ — ٢) وبصرف النظر عن الكيفية التى يؤثر بها أحدهما على الآخر ، وليكن عن طريق زنبرك يربط فيما بينهما ، أو عن طريق التجاذب الكهربى مثلا ، فإننا حتما نصل عن طريق التجربة إلى أن نسبة قيمتى عجلة كل من ا ، ب ثابتة وأن العجلتين متضادتان فى الاتجاه تماماً . إن نسبة قيمة عجلة ا إلى قيمة عجلة ب تؤخذ مساوية للنسبة العكسية لكتلتيهما . . أى نسبة كتلة ب إلى كتلة ا هكذا .

$$\frac{\text{ح}_{\text{ا}}}{\text{ح}_{\text{ب}}} = \frac{\text{ك}_{\text{ب}}}{\text{ك}_{\text{ا}}}$$

أو

$$\text{ح}_{\text{ا}}\,\text{ك}_{\text{ا}} = \text{ح}_{\text{ب}}\,\text{ك}_{\text{ب}}$$

التى لم تخرج عن كونها صيغة للقانون الثالث للحركة تعرف فيها القوة عن طريق القانون الثانى لها . ولتكملة وصف الكتلة ، لابد أن نجعل كلا من ا ، ب يؤثر بدوره تأثيراً تبادلياً من النوع نفسه على جسم كتلته الوحدة ، $\text{ك}_{\text{و}} = ١$

$$\therefore \quad \frac{\text{ح}_{\text{ا}}}{\text{ح}_{\text{و}}} = \frac{\text{ك}_{\text{و}}}{\text{ك}_{\text{ا}}} = \frac{١}{\text{ك}_{\text{ا}}}$$

أى أن $\quad \text{ك}_{\text{ا}} = \frac{\text{ح}_{\text{و}}}{\text{ح}_{\text{ا}}}$

بالمثل فإن $\text{ك}_{\text{ب}} = \frac{\text{ح}_{\text{و}}}{\text{ح}_{\text{ب}}}$

فمن وجهة النظر الجديدة هذه تعتبر كتلة الجسم بأنها النسبة بين عجلة جسم عيارى إلى عجلة الجسم نفسه ، عند ما يسمح لهما بتبادل التأثير . وقد يبدو هذا

التعريف ناقصاً ، لأنه يمكن المحاجة بأنه لابد وأن يكون للكتلة طبيعة أكثر أساسية من كونها فقط مقياساً للعجلة النسبية للجسم . ولكن عند ما نسأل عن هذه الطبيعة الأساسية للكتلة لانجد أمامنا سوى الغموض . إن القياس وحده هو الذى يصف الكتلة وجميع قياسات الكتلة تحوى تأثيراً تبادلياً من النوع الذى ذكرناه .

٤ — ٨ تمارين على قوانين الحركة :

يمكننا أن نذكر باطمئنان ، أن باقى هذا الكتاب سوف يحتوى على أمثلة لترجمة قوانين « نيوتن » وتعليلها . ولكن فى أحوال كثيرة يحجب تعقد الموضوع عملية استخدامها ، بل الأكثر من هذا أن استخدامها يمر أحياناً دون أن ننتبه إليه لأخذنا إياها كقضية مسلم بها. وفى جميع الأحوال تعطى سهولة صياغتها شعوراً خادعاً بأنها مفهومة . لذا سوف نوضحها ببعض التمارين .

مثال ١ : جسم كتلته ٥٠ جم يرتكز على منضدة أفقية عديمة الاحتكاك تؤثر عليه قوة مقدارها ١٠٠٠ داين . ما هى العجلة الناتجة ؟

المعلومات : ك = ٥٠ جم ، ق = ١٠٠٠ داين

ح = ؟

الحل : بما أن المنضدة ملساء تماماً وأفقية ، فليس هناك قوى احتكاك وجاذبية . القوة الوحيدة المستخدمة هى التى ينشأ عنها العجلة .

ق = ك ح

١٠٠٠ = ٥٠ ح

ح = ٢٠ سم / ث^{٢} (الجواب)

مثال ٢ : لنفرض أن مثال ١ قد تعدل بحيث يسمح باحتكاك قدره ٢٠٠ داين . ما هى العجلة ؟

المعلومات : ك = ٥٠ جم ، ق = ١٠٠٠ داين

ح = قوة الاحتكاك = ٢٠٠ داين

الحل : توجدالآن قوة مضادة مقدارها ٢٠٠ داين تنشأ عند الحركة فقط . فإذا كانت القوة المستخدمة ٢٠٠ داين أو أقل ، فإنه لاتوجد حركة وبالتالى عجلة . أما الآن فإن القوة غير المتزنة صالحة لإحداث عجلة فهى ١٠٠٠ – ٢٠٠ = ٨٠٠ داين . لذا فإن

ق = ك حـ

٨٠٠ = ٥٠ حـ

حـ = ١٦ سم / ث^{٢} (الجواب)

مثال ٣ : شخص من هواة الانزلاق على الجليد يزن ٥٠ كجم ، يبدأ الانزلاق بسرعة ابتدائية قدرها ٢٠٠ سم/ ث ، وقوة الاحتكاك بين صندله والجليد ٠٠٠ ، ١٠٠٠ داين . إلى أى مدى يمكن أن ينزلق ؟

المعلومات ك = ٥٠ كجم = ٠٠٠ ، ٥٠ جم ، ع. = ٢٠٠ سم/ ث

ع = ٠ ، قوة الاحتكاك = ٠٠٠ ، ١٠٠٠ داين .

ف = ؟

الحل : فى هذه الحالة القوة المستخدمة الوحيدة هى قوة الاحتكاك وهى تعمل على تقصير حركة المنزلق (أى إعطائها عجلة تقصيرية)

القانون الثانى : ق = ك حـ ،

– ٠٠٠ ، ١٠٠٠ = ٠٠٠ ، ٥٠ حـ

حـ = – ٢٠ سم / ث

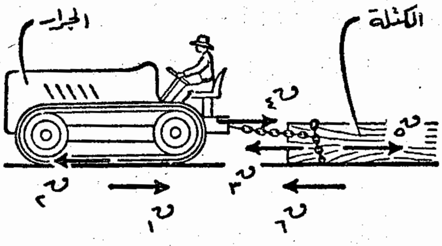
المعادلة ٣ – ٣ : ع^{٢} = ع.^{٢} + ٢ حـ ف = ٠

٠ = (٢٠٠)^{٢} – ٢ × ٢٠ × ف

ف = ١٠٠٠ سم (الجواب)

مثال ٤ : هذه مسألة تعطى دائماً لاختبار استيعاب الطالب للقانون الثالث ، وهى ممثلة بشكل (٤ – ٣) وتحتوى على المعلومات الآتية : جرار يسحب

كتلة خشبية بانطلاق ثابت على ممر أفقي . وهناك ميزان زنبركي مثبت في سلسلة السحب يدل على أن الجرار يشد بقوة قدرها ١٠^٨ داين . أي قوة تؤثر بها الكتلة الخشبية على الجرار ؟ الجواب الحاضر من أي شخص يكون قد ألم بالقانون الثالث لنيوتن هو : ١٠^٨ داين . والآن نسأل : إذا كان الجرار يشد إلى الأمام بقوة قدرها ١٠^٨ ويشد من الخلف بوساطة الكتلة الخشبية بقوة قدرها ١٠^٨ داين ، فلماذا يتحرك الجرار ؟



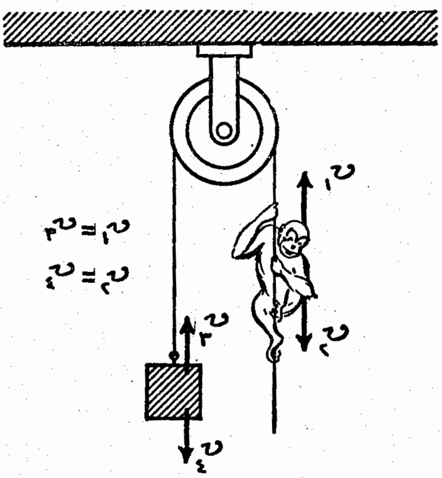
(شكل ٤ — ٣)

والمأمول أن هذه المسألة لا ينشأ معها تناقض بالنسبة لقارئ هذا الباب . الجرار يؤثر بقوة على الكتلة ، والكتلة تؤثر بقوة على الجرار ، ولكن هاتين لا يمكن جمعهما لأنهما تؤثران على جسمين مختلفين (إحداهما رد فعل للأخرى) .

ويحتاج حل هذه المسألة إلى عناية . يحتوي شكل ٤ — ٣ على النظام الذي يحتوي على الجرار ، والكتلة ، والأرض . الجرار يدفع الأرض بقوة إلى الخلف $\overrightarrow{ق_{١}}$ ورد فعل هذه عبارة عن قوة إلى الأمام $\overrightarrow{ق_{٢}}$. القوة الأمامية على الكتلة بوساطة السلسلة هي $\overrightarrow{ق_{٣}}$ ، ورد فعل هذه على الجرار هي $\overrightarrow{ق_{٤}}$. لذا فإن القوة الكلية على الجرار هي $\overrightarrow{ق_{٢}} + \overrightarrow{ق_{٤}} = ٠$ (الجرار لا يتحرك بعجلة) . بعد هذا اعتبر الكتلة المسحوبة : قوة الاحتكاك بين الكتلة والممر هي $\overrightarrow{ق_{٥}}$ تؤثر على الكتلة ، ورد فعل $\overrightarrow{ق_{٥}}$ هو قوة $\overrightarrow{ق_{٦}}$ تؤثر على الأرض (الكتلة تحاول شد الأرض معها) . القوة الكلية المؤثرة على الكتلة هي $\overrightarrow{ق_{٣}} + \overrightarrow{ق_{٥}} = ٠$ (الكتلة لا تتحرك بعجلة) . وأخيراً ما هي القوة التي تؤثر على الأرض ؟ هذه هي : $\overrightarrow{ق_{١}} + \overrightarrow{ق_{٦}} = ٠$. (مجموعة

الجرار والكتلة لا تسبب فى إكساب الأرض عجلة) . بهذه الكيفية نكون قد عملنا حساب جميع القوى المؤثرة ورددنا على جميع الأسئلة .

مثال ٥ : وهناك تطبيق طريف عن قوانين « نيوتن » يعرف بمسألة القرد والحبل (شكل ٤ — ٤) ويتلخص فى حبل يمر على بكرة ملساء عديمة الاحتكاك . وهناك قرد يمسك فى الحبل من جهة وثقل يكفى لموازنة القرد فى الجهة الأخرى . يقرر القرد تسلق الحبل ، فما هى حركة الثقل المقابل ؟ قد تثير هذه المسألة مناقشة حامية ، ولكن بتطبيق القانونين الثانى والثالث لنيوتن يمكن حسم الموضوع فى الحال. عندما يكون القرد فى حالة سكون فإن الحبل لابد أن يؤثر بقوة إلى أعلى $\overrightarrow{ق_{١}}$ مساوية لثقل القرد $\overrightarrow{ق_{٢}}$. لكى يكسب القرد نفسه عجلة ، كما يجب أن يفعل ، ليبدأ التحرك ، يجب أن يشد القرد الحبل شداً إضافياً (القانون الثانى) والحبل لابد أن يرد هذه القوة بقوة إضافية مساوية (القانون الثالث) ، والبكرة لا تلعب دوراً أكثر من قدرتها على عكس اتجاه الحبل . ولكن أى شد إضافى فى الحبل لابد أن يتسبب فى قوة تضاف إلى $\overrightarrow{ق_{٣}}$ تؤثر على الجسم المقابل (القانون الثالث) ، وهذه لا يمكن أن ينشأ عنها إلا عجلة تؤثر فى الجسم إلى أعلى (القانون الثانى) . لذا فإن الجسم يصعد بنفس معدل صعود القرد ، وتتشابه حركاتهما (فكأن القرد لا يستطيع الصعود إلا بصعود الجسم) .



(شكل ٤ — ٤)

٤ — ٩ الحكم الاستقرائى والحكم الاستنباطى :

فى الباب الثالث ناقشنا العلاقات التى تربط بين متغيرات الفضاء ، وهى المسافة والزمن والسرعة والعجلة ، مع أن هذه ، بحكم المنطق ، كان يجب أن تلى الباب الحالى المختص بالعلاقات الأساسية بين العجلة والكتلة والقوة . الواقع أننا تطلعنا إلى خصائص الحركة من قبل أن نسأل ما هى المسببات الأساسية لنشوء هذه الحركة . وبعبارة أخرى إن الباب الثالث قد أقام نظرية لربط متغيرات معينة من متغيرات الفضاء من قبل أن نعرف ما إذا كان للنظرية أى تطبيق على الحركات التى نشاهدها فعلا فى الطبيعة . الحقيقة أننا جانبنا التسلسل المنطقى (والتاريخى أيضاً) لنتمكن من تحقيق غرضين هما :

الأول هو أنه من المفيد أن يكون لدينا مفهوم واضح عن العجلة لإدراك قوانين نيوتن .

والثانى هو أن ترتيب عرضنا لهذه الموضوعات يمكن الاستفادة منه عن طريق المناقشة فى تهيئة مدخل ننفذ منه إلى عرض طريقتين هامتين من طرق الفكر ، الاستقراء والاستنباط . ومن الصعب الإحاطة بالتشعب الكامل لهذين القسمين من المنطق فى هذا الكتاب . ولكن من الضرورى بحثهما ولو بصفة بسيطة مختصرة لما لهما من دور أساسى فى وسائل العلم .

فى تفهم الأمور عن طريق الاستنباط فى العلم يبدأ الإنسان بمجموعة فروض أو مقدمات ، ويستخدم قواعد المنطق (أو الحساب) ليستخلص نتائج معينة من هذه الفروض ، وبحكم المنطق تكون النتائج متمشية مع الفروض . على أن هذه النتائج قد تطابق أو لا تطابق الواقع فى العالم الخارجى . فقط عند ما تكون الفروض منطبقة على الحقيقة يمكننا أن نجزم بأن النتائج تمثل الواقع .

فى النظرية الفيزيائية تنتهى بنا الطريقة الاستنباطية إلى نتائج يمكن اختبار مطابقتها للحقيقة فقط ، لاتوجد وسيلة استنباطية لإقامة فروض النظرية . نذكر

على سبيل التمثيل أننا أنشأنا فى الباب الثالث نظاماً استنباطياً لعلم الحركة . فقد وضعنا مجموعة فروض مؤسسة على تعاريف السرعة والعجلة ، وابتكرنا نوعاً من المنطق – جبر الكميات المتجهة وغير المتجهة – يصلح للعمل بهذه الفروض . كانت النتائج معادلات تربط بين الإزاحة والسرعة والعجلة والزمن للحركة ذات العجلة المنتظمة . والمحك كما سنرى أن هذه الحركة عامة ومنتشرة فى الطبيعة ، وإنما يرجع الفضل فى ابتكار حركة وجدت فعلا إلى فروض النظرية .

وفى العلم لا تخرج الطريقة الاستنباطية عن كونها نوعاً من المران المنطقى إلا إذا تمكنا من الإجابة باطمئنان عن سؤال واحد فى الموضوع الذى يشغلنا : هل الفروض الموضوعة تؤدى إلى حركة مشاهدة فعلا فى الطبيعة ؟ وبعبارة أخرى ، إذا كان ما يحدث لا يتفق مع الفروض المستخدمة فى الوصول إلى نتيجة فمعنى ذلك أن مجهود الوصول إلى حكم عقلى ، يصير نوعاً من الرياضة المنطقية ، خال تماماً من أى معنى أو أهمية فيزيائية . وليس هناك تردد فى أن هذا يجب أن يكون واضحاً تماماً للطالب . ولكن الغريب أنه فى حقبة زمنية استمرت ألفى عام (بالتقريب من عام ٥٠٠ قبل الميلاد إلى عام ١٥٠٠ بعد الميلاد) كان البحث فى ماهية الظواهر الفيزيائية – الحادثة فعلا – معتبراً ذا أهمية ثانوية ، وكان نصيبه الإهمال من لدن المفكرين المبدعين فى هذه الفترة الزمنية الطويلة . ولو أن هذا النوع من التفكير لم يمر دون انتقاد ، إلا أنه قد استمر حتى القرن السادس عشر حينما هاجم جاليليو هذا النظام الفكرى هجوماً ناجحاً مستخدماً المشاهدات التجريبية للتحقق من صحة الفروض الموضوعة . ويطلق على «جاليليو» اسم « أبو العلم التجريبى » ، لا لأنه أول من قام بالتجارب العلمية ، ولكن لأنه كان أول من أصر على ضرورة القياس قبل صياغة العموميات ، ولعبقريته أكبر الأثر فى اختيار القياسات التى تؤدى إلى نتائج مفيدة . إن النتائج المذكورة فى الباب الثالث قد أسسها « نيوتن » على التجربة ، وليس بالطريقة الاستنباطية التى اتبعناها هناك .

وعملية الوصول إلى عموميات تتعلق بالسلوك الطبيعى بشرط البدء من المشاهدات أولا تسمى بالاستقراء . وحيث إن الإنسان لا يمكنه مشاهدة جميع الظواهر المتحدة

النوع قبل الوصول إلى نتيجة ، فإن الإلهام يلعب دوراً هامًّا فى الموضوع . لذلك لا توجد قاعدة يمكن اتباعها فى الطريقة الاستقرائية . وحيث إن الاستقراء مسئول عن جزء كبير من المجهود العلمى ، فمن ذلك نستنتج أنه لاتوجد قواعد بسيطة فى طرق العلم . ومع أن الخبرات السابقة تلعب دوراً فى الطريقة الاستقرائية إلا أن الباحث التجريبى المتمرس هو الذى يجب ، كقاعدة ، أن يكون له الحق فى الحكم على ما سبق ، وإدخاله ضمن تقييمات النتائج التى توصل إليها بغرض الوصول إلى قوانين عامة . كذلك نترك للباحث النظرى المفكر مهمة اعتبار ما جرى عليه العرف وحققته الخبرة عن صياغته لفروضه . ولا يستطيع أى الباحثين أن يرسم مقدماً خريطة يتبعها ليتقيد بها فى الوصول من المشاهدة إلى العموميات الناجحة .

لذا فإن الطريقة العلمية خليط من عمليات استنباطية واستقرائية يكمل بعضها البعض ، ولا يمكن الاقتصار على نوع واحد من هذين النوعين ، إذ أن الاعتماد على القياس المنطقى المطلق لا يعطى تأكيداً بأن الفروض الموضوعة صحيحة أو بأن نتائجها تنطبق على الحقيقة الراهنة . ولكن الطريقة الاستنباطية المعتمدة على استقراءات من نتائج المشاهدة هى المتبعة فى الوصول إلى كثير من نظريات الفيزياء . فالاستقراء والاستنباط يكونان معاً أداة قوية جدًّا .

تمارين

١ — ما هى القوة التى نحتاج إليها لإعطاء كتلة مقدارها كيلوجرام عجلة قدرها ٤٠ سم/ث٢ ؟

الجواب : ٤٠٠٠٠ داين (أو) ٤٠ كيلوداين .

٢ — استخدمت قوة مقدارها ٥٠٠ داين فى التأثير على جسم كتلته ١٠ جم بطول مسافة قدرها ٢٢٥ سم . إذا ابتدأت الكتلة من السكون فما عجلتها ، وما الزمن الذى استغرقته الكتلة فى قطع المسافة المذكورة ؟

الجواب : ٥٠ سم/ث٢ ، ٣ ثوان .

٣ — قوة قدرها ٢٠٠٠ داين تؤثر على كتلة مقدارها ١٠ جم لمدة ١٠ ثوان . إذا ابتدأت الكتاة من السكون فما سرعتها بعد ٤٠ ثانية ؟

الجواب : ٢٠٠ سم / ث

٤ — بدأ جسم معين من حالة السكون فوصل إلى سرعة قدرها ٦٠سم/ ث بعد تحركه مترين . إذا كانت القوة المستخدمة ١ ميجاداين فما كتلة الجسم ؟

الجواب : ١١١ كجم .

٥ — ينزلق كتاب كتلته ٥٠٠ جم على منضدة أفقية بسرعة ابتدائية مقدارها ٢٠٠ سم/ث . إذا وصل الكتاب إلى حالة السكون بعد ٤ ثوان ، فما هى

الجواب : ٢٥ كيلوداين .

٦ — كتلة مقدارها ٧٠٠ جم تدور فى مستو أفقى وهى متصلة بنهاية حبل طوله ٥٠ سم فتعمل ١٠ دورات /ث . ما هى القوة المركزية الجاذبة على الكتلة ؟

الجواب : ١٣٨ ميجا داين .

مراجع مقترحة للاطلاع

"A Treasury of Science", New York, Harper & Brothers, 1946.

يحوى صوراً من مقطوعات كتاب نيوتن فى أصول الرياضة حيث تبحث قوانين الحركة .

Dampier, Sir William, "A History of Science", New York, The Macmillan Co. 1946.

يحوى الباب الرابع عرضاً تاريخيًّا وانتقاديًّا لديناميكيا نيوتن .

Jeans, Sir James, "The Growth of Physical Science", New York, The Macmillan Co. 1948.

يحوى البابان الخامس والسادس عرضاً ممتعاً عن تطور ديناميكا نيوتن .

Mach, E. "The Science of Mechanics", La Salle, 111. Open Court Publishing Co. 1942 (Translation)

الباب الثانى هوعرض سامٍ ومنطقى لما حققه نيوتن وماعلله ماخ لفكرة الكتلة .

Magie, W.F. "Source Book in Physics", New York, McGraw-Hill Book Co. 1935.

تحوى صفحات ٣٠ — ٤٥ مقتطفات من أعمال نيوتن الأصلية فى الديناميكا .

الفصل الخامس

ديناميكا الجسيمات — الجاذبية

٥ — ١ قانون الجاذبية « لنيوتن » :

فى عام ١٦٦٣ حل مرض الطاعون بانجلترا ، فاضطر « نيوتن » إلى هجر جامعته فى « كمبردج » والرجوع إلى منزله ببلدته . وهناك استقر مدة عامين مثمرين اكتشف أثناءهما نظرية ذات الحدين واخترع حساب التفاضل والتكامل ، وابتكر النظرية الصحيحة للألوان ، ووضع أسس نظريته عن الجاذبية ، كل هذا قبل أن يبلغ من العمر ٢٤ عاما .

كان نيوتن على اقتناع تام بأن السبب فى سقوط الأجسام إلى الأرض ، إنما يرجع إلى المؤثر نفسه الذى يتسبب فى دوران الأرض وغيرها من الكواكب السيارة فى أفلاكها الدائرية تقريبا حول الشمس ، وفى دوران القمر حول الأرض . ويتلخص هذا السبب فى أن هناك قوة تجاذب بين الشمس والأرض تمسك الأخيرة فى مدارها حول الشمس ، وأن هذا النوع من القوة هو الذى يتسبب فى سقوط كتلة معينة إلى سطح الأرض . إن فكرة وجود قوة قد اقترحت أحيانا قبل وقت نيوتن كرأى من الآراء ، ولكن نيوتن هو الذى فرض صيغة القانون الذى وحد بين القياسات الفلكية والمشاهدات الأرضية ، ومن مناقشة هندسية بسيطة مستخدما المعلومات الشائعة عن زمن دوران القمر حول الأرض ونصف قطر مداره حولها — ونصف قطر الأرض نفسه ، استنتج « نيوتن » أنه يمكن التعبير عن قوة الجاذبية بالصيغة الآتية :

« توجد قوة جاذبية بين أزواج الجسيمات فى العالم . تؤثر هذه القوة فى اتجاه الخط الواصل بين جسمين ويتناسب مقدارها طردياً مع حاصل ضرب كتلتى الجسمين ، وعكسيا مع مربع المسافة التى تفصلهما » .

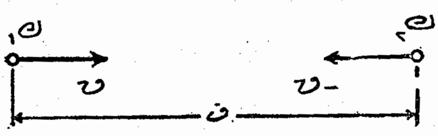
وبالرموز يمكن كتابتها على هيئة :

$$ق = ج \frac{ك_١ ك_٢}{ف^٢} \quad . . . . \quad (٥ – ١)$$

حيث $ك_١$ ، $ك_٢$ كتلتا الجسمين ، ف المسافة بينهما ، ج ثابت تناسب ، فائدته أنه يعطى القوة ق وحدتها المناسبة ، طالما وضعت وحدات معينة لكل من $ك_١$ ، $ك_٢$ ، ف . وقد بينت التجارب التى عملت فيما بعد (بند ٥ – ٧) أن قيمة ج هى :

$$ج = ٦,٦٧٠ \times ١٠^{-٨} \text{ سم}^٣ / \text{جم . ث}^٢ .$$

وباستخدام معلومات « كپلر » عن أبعاد مدارات الكواكب حول الشمس بين « نيوتن » أن قانون القوة نفسه الممثل بالمعادلة ٥ – ١ ينطبق على هذه الأحوال أيضاً .

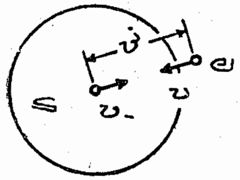


(شكل ٥ – ١)

٥ – ٢ مركز الثقل :

أمسك « نيوتن » عن نشر قانون الجاذبية مدة تقرب من ٢٠ عاما . وكان أحد الدواعى المحتملة لهذا الاحتياط ترجع إلى السبب الآتى :

بالنسبة لأبعادها الشاسعة فيما بينها ، يمكن اعتبار الأجسام الفلكية كنقط تقريبا . ولكن هل ينطبق القانون على جسمين أحدهما كالأرض حجماً والثانى جسم صغير نسبياً ساقط على سطحها ؟ (شكل ٥–٢) . باستخدام حساب التفاضل والتكامل الجديد الذى



(شكل ٥ – ٢)

اخترعه توصل « نيوتن » إلى النتيجة الآتية : كل جسم متماسك يحتوى داخله على نقطة تسمى « مركز ثقله » يمكن اعتبار كتلته كلها مركزة فيها . وما علينا فى هذه الحالة إلا قياس المسافات بين مراكز ثقل الأجسام لإمكان تطبيق قانون الجاذبية . وأخيرا بالنسبة للتماثل الكامل لكرة متجانسة ، ينطبق مركز ثقلها على مركزها الهندسى . وللأجسام الأخرى ذات الأشكال الهندسية المعينة يمكن حساب

مركز الثقل بحساب التفاضل والتكامل .

٥ ـ ٣ الجاذبية على سطح الأرض :

إن جسما على سطح الأرض أو قريبا من سطحها ينجذب بوساطة جميع الجسيمات التى تكون كتلة الأرض . وبما أن الأرض كروية تقريبا ، فإن محصلة القوى على الجسم تتجه إلى مركز الأرض ، وتعطى المعادلة (٥ ـ ١) مقدار قوة الجذب ، حيث ف فى هذه الحالة نصف قطر الأرض (وبما أن نصف قطر الأرض ... ، ... ، ٢١ قدم ، فإن مسافة عدة أقدام فوق سطح الأرض لا تؤثر فى النتيجة) . وحيث إن معظم الأجسام الأرضية صغيرة بالنسبة إلى الأرض ، فإنه يمكن اعتبارها نقطاً مادية ، وتتجه محصلة قوى الجاذبية المؤثرة على الجسم إلى مركز الأرض ، ويكون مقدارها

$$\text{ق} = \text{ج}\,\frac{\text{ك}\,\text{ل}}{\text{نق}^{2}} = \left(\text{ج}\,\frac{\text{ك}}{\text{نق}^{2}}\right)\text{ل} \quad \ldots\ldots \quad (٥ - ٢)$$

حيث ك كتلة الأرض، ل كتلة الجسم الأرضى، نق نصف قطر الأرض . وتعتبر كتلة الجسم متركزة فى مركز ثقله . وإذا اعتبرنا الأرض كروية تماما ، فإن المضروب الموجود بين القوسين ، يكون ثابتا على سطح الأرض . وبتذكر قانون الحركة الثانى لنيوتن نجد أن القوة فيه على هيئة كتلة مضروبة فى عجلة ، وإذن فإن $\left(\text{ج}\,\frac{\text{ك}}{\text{نق}^{2}}\right)$ لها وحدة العجلة. تسمى هذه بعجلة الجاذبية على سطح الأرض ، ويرمز إليها بالرمز ء . وقيمتها هى

$$\text{ء} = \text{ج}\,\frac{\text{ك}}{\text{نق}^{2}} \quad \ldots\ldots \quad (٥ - ٣)$$

(ويجب عدم الالتباس بين عجلة الجاذبية ء ، وثابت الجاذبية ج . فإن الأولى هى عجلة تسقط بها الأجسام من تلقاء نفسها على الأرض ، وأما الثانية فهى ثابت تناسب فى قانون الجاذبية العام) .

إن قوة الجاذبية على جسم أرضى هى القوة الممثلة بالمعادلة (٥ — ٢) . وبإهمال الدفع الواقع على الجسم من الوسط الجوى الذى نعيش فيه ، نستنتج من هذه المعادلة أن قوة الجاذبية الواقعة على الجسم تتناسب مع كتلته . أما عجلة الجاذبية التى تمثلها المعادلة (٥ — ٣) فهى مستقلة عن كتلة الجسم الساقط ووضعه أثناء السقوط (لاحظ أن نق تمثل هنا بعد الجسم عن مركز الأرض وهى تختلف عن نصف قطر الأرض اختلافا بسيطا حتى عند ما يسقط الجسم من ارتفاع كبير نسبياً) وتسمى قوة الجاذبية على الجسم بثقل الجسم أو وزنه . وإذا رمزنا لوزن الجسم بالرمز و فإن و = ك ى . . . . (٥ — ٤) .

وهذه المعادلة ناشئة من المعادلتين (٥ — ٢) ، (٥ — ٣) وتشير إلى أن وزن الجسم يكسبه عجلة متجهة إلى مركز الأرض — وهى عجلة رأسية — إلا إذا وجدت قوة خلاف قوة الجاذبية تضادها وتلغى تأثيرها . إن الأجسام إذا تركت فانها تسقط دائما إلى الأرض . أما الأسباب التى لا تمت إلى الجاذبية بصلة ، وتعوق هذه الحركة فترجع إلى الحوامل الثابتة مثل المناضد والكراسى . فالقوى التى تعادل قوة الجاذبية وتتزن معها ترجع إلى قوى شد وضغط تمدنا به هذه الحوامل . وهناك قوة موجودة تعدل دائما فى سقوط الجسم وهى قوة احتكاك الهواء التى تعطل هذا السقوط وتجعل قيمة ى الفعلية أقل .

ويمكننا أن ننظر إلى موضوع قوة الجاذبية على الأجسام الأرضية من وجهة نظر مختلفة قليلا تفيد بعض الشىء فى توضيح معنى القانون الثالث للحركة . إن قوة الجاذبية على جسم لها رد فعل يؤثر على الأرض عند مركزها ، وعندما يسقط الجسم ، فإنه توجد عجلة تؤثر على الأرض متجهة إلى الجسم بالإضافة إلى عجلة سقوط الجسم نفسه ، فوضع حاجز على شكل حامل للجسم هو وسيلة ميكانيكية لحفظ هاتين الكتلتين المنجذبتين مبتعدتين . وبطبيعة الحال فإن الفرق العظيم بين كتلة الأرض وكتلة الجسم الساقط يجعل عجلة الأرض مهملة بالنسبة إلى ى .

٥ ــ ٤ حركة السقوط الحر :

من الصعب قياس العجلة السريعة للجسم قياساً مباشراً ، ويجب فى هذه الحالة إزالة احتكاك الهواء على قدر الإمكان ، كما يجب أن يكون لدينا وسائل توقيت دقيقة . وأبسط من الطرق المباشرة وأدق هو استخدام بندول يقاس طوله وزمن ذبذبته بدقة كبيرة (ونناقش هذه الطريقة باختصار فى بند ١٠ ــ ٢) . والنتيجة إلى درجة كافية من الدقة باستخدام هذه الطريقة هى

$$ء = ٩٨٠ \text{ سم / ث}^٢.$$

وهذه القيمة أقل قليلا عند الارتفاعات الكبيرة بالنسبة إلى زيادة المسافة التى تفصل الجسم عن مركز الأرض . وهناك تعديل آخر فى قيمة ء يتوقف على خط العرض . وهذا التغير الأخير يرجع إلى عدة عوامل : بما أن الأرض وجميع الكتل التى عليها تدور ، فلابد أن تتعرض هذه الأجسام لعجلة مركزية طاردة . هذه العجلة تكون أكبر ما يمكن عند خط الاستواء ، وأقل من ذلك عند خطوط العرض التى فوق خط الاستواء أو تحته . والقوة اللازمة لحفظ هذه العجلة تستمد من الجذب التثاقلى ، ولذا تنقص عجلة السقوط الحر للجسم . على هذا الأساس تكون قيمة ء أقل مايمكن عند خط الاستواء ، وأكبر ما يمكن عند القطبين . وهناك سبب آخر له تأثير مشابه على قيمة ء ، فإن الأرض مفرطحة قليلا عند القطبين مما يجعل قيمة نق أقل قليلا عند القطبين منها عند خط الاستواء ، وحيث إن $نق^٢$ توجد فى مقام المعادلة (٥ ــ ٣) فإن قيمة ء تكون أكبر ما يمكن عند القطبين . وأخيرا هناك عوامل صغيرة محلية ترجع إلى وجود تضاريس غير منتظمة التوزيع مثل البحار والجبال ، وإلى التركيبات تحت الأرضية التى قد تتكون من مواد ثقيلة أو خفيفة . وقيمة ء المقاسة عند مستوى البحر تتراوح بين ٩٧٧,٩٩ سم / $ث^٢$ عند خط الاستواء ، ٩٨٣,٢١ سم / $ث^٢$ عند القطب الشمالى .

ومعادلات الحركة الخطية العجلية التى حصلنا عليها فى الباب الثالث ، تنطبق هنا مباشرة على الأجسام الساقطة ، لأن هذه المعادلات قد اشتقت على أساس وجود عجلة منتظمة . وفى حالة التغيرات البسيطة فى الارتفاع وخط العرض يمكن اعتبار (ء)

ثابتة إلى درجة كبيرة من التقريب . لذا فإن معادلات الحركة للسقوط الحر تأخذ الصيغ الآتية :

(ح = ء ، ف = ر للارتفاع الرأسى)

ع = ع$_{٠}$ + ء ن

ر = ع$_{٠}$ ن + ١ / ٢ ء ن^{٢}

ع^{٢} = ع$_{٠}^{٢}$ + ٢ ء ر

وعندما تكون ع$_{٠}$ = ٠ ، فإن ع = ء ن

ر = ١ / ٢ ء ن^{٢}

ع^{٢} = ٢ ء ر

لاحظ أن الكتلة ك لجسم ساقط سقوطاً حرًّا لا تدخل فى هذه المعادلات .

مثال ١ : تسقط كرة من قمة برج ارتفاعه ٥٠ مترا . بفرض إهمال الاحتكاك ما زمن سقوطها ، وبأية سرعة تصل إلى الأرض ؟

المعلومات : ر = ٥٠ م = ٥٠٠٠ سم ، ء = ٩٨٠ سم / ث^{٢}

ع$_{٠}$ = ٠ ، ن = ؟ ، ع = ؟

الحل : ٥٠٠٠ = $\frac{١}{٢}$ × ٩٨٠ × ن^{٢} ، ن^{٢} = $\frac{١٠٠٠٠}{٩٨٠}$

ن = ٣,٢ ث (الجواب)

ع = ء ن = ٩٨٠ × ٣,٢

= ٣١٠٠ سم / ث = ٣١ م / ث (الجواب)

أو

ع^{٢} = ٢ ء ر = ٢ × ٩٨٠ × ٥٠٠٠

ع = ٣١٠٠ سم/ث (كالقيمة السابقة)

مثال ٢ : تقذف كرة رأسيًّا بسرعة ابتدائية قدرها ١٠ م / ث. إلى أى ارتفاع تصل ؟ وما هو الزمن الذى تستغرقه للوصول إلى أقصى ارتفاع ؟

المعلومات : ع$_{\text{٠}}$ = ١٠ م / ث = ١٠٠٠ سم / ث ، ع = ٠ (عندالقمة)

ء = — ٩٨٠ سم / ث$^{\text{٢}}$ (الحركة ذات عجلة تقصيرية)

ف = ؟ ، ن = ؟

الحل : ع$^{\text{٢}}$ = ع$_{\text{٠}}^{\text{٢}}$ + ٢ ء ف

٠ = (١٠٠٠)$^{\text{٢}}$ — ٢ × ٩٨٠ × ف

ف = ٥١١ سم (الجواب)

ع = ع$_{\text{٠}}$ + ء ن

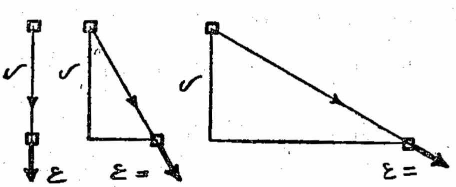
٠ = ١٠٠٠ — ٩٨٠ × ن

ن = ١,٠٢ ث (الجواب)

ويجب أن يتضح من هذه المعادلات أن سقوط الكرة هوحالة مماثلة تماما لصعودها ، لأنه إذا سقطت الكرة من هذا الارتفاع الذى تصل إليه بسرعة صفر عند قذفها ، فإن سرعتها النهائية تكون هى سرعة القذف إلى أعلى ، وزمن السقوط يساوى تماماً زمن الصعود (لأن تبادل ع ، ع$_{\text{٠}}$ للقيمة صفر يقابله تغير إشارة ء) .

٥ — ٥ المستوى المائل :

إن أحد انتصارات « جاليليو » الكبرى فى عالم التجارب ، هو إثباته أن عجلة الجاذبية مقدار ثابت . وحيث إنه لم تكن لديه وسائل توقيت دقيقة لعمل مشاهدة مباشرة على سقوط الأجسام ، فقد ابتكر لذلك وسيلة المستوى المائل — لإبطاء عجلة السقوط . فقد نجح فى أن يبرهن بفرض اعتبار المستوى عديم الاحتكاك أن سرعة الجسم بعد الانزلاق تتوقف على ارتفاع المستوى ولا تتوقف على طوله (شكل ٥ — ٣) ولا يمكننا القول

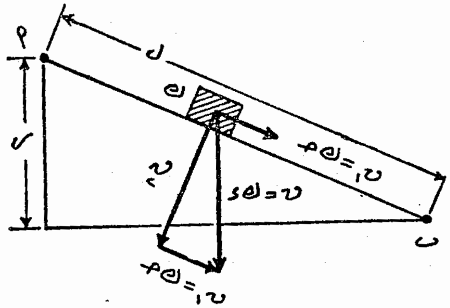


(شكل ٥ — ٣)

بأن هذا لابد أن يكون واضحا بالبديهة . لذلك سوف نحلل الموضوع . اعتبر الجسم مثالياً والمستوى خالياً من الاحتكاك (شكل ٥ — ٤) . الجسم يجذب

إلى الأرض بقوة ق = ك ء . هذه القوة تسبب عجلة يتحرك بها الجسم إلى أسفل المنحنى ، وحيث إن الجسم مهيأ لينزلق على المستوى ، فإن مركبة القوة فى اتجاه هذا المستوى هى التى تنشىء العجلة .

إذا أسمينا هذه المركبة ق_1 وطبقنا القانون الثانى لنيوتن $\text{ق}_1 = \text{ك حـ}$ حيث حـ هى العجلة إلى أسفل المستوى . والمركبة الأخرى للقوة ق تكون عمودية على المستوى وتتوازن طول الوقت مع قوة ضغط المستوى على الجسم . مثلث القوة ومثلث المستوى المائل متماثلان (زواياهما المتناظرة متساوية) ، لذا فإن



(شكل ٥ — ٤)

$$\frac{\text{ق}_1}{\text{ق}} = \frac{\text{ر}}{\text{ل}} = \frac{\text{ك حـ}}{\text{ك ء}}$$

أو

$$\text{حـ} = \frac{\text{ر}}{\text{ل}}\ \text{ء}$$

أى أن العجلة بطول المستوى هى عجلة منتظمة وهى كسر قيمته $\frac{\text{ر}}{\text{ل}}$ من قيمة عجلة الجاذبية (التى هى عجلة السقوط الحر) .

وحيث إن العجلة إلى أسفل المستوى منتظمة ، فإننا نصل إلى السرعة اللحظية ع للجسيم مستخدمين المعادلة (٣ — ٦) :

$$\text{ع}^2 = ٢\ \text{حـ ف}$$

حيث ف المسافة التى تحركها الجسيم على المستوى من وضع السكون أ . وعند الوصول إلى قدم المستوى يكون للجسيم سرعة نهائية ع حيث

$$\text{ع}^2 = ٢\ \text{حـ ل}$$

ولكن

$$ح = \frac{س}{ل} ء$$

إذن

$$ع^2 = \frac{2س}{ل} ء \times ل$$

$$ع^2 = 2 ء س$$

وإذا سمح للجسيم بالسقوط من ا فإنه يأخذ بحرية العجلة ء ويقطع المسافة س فيصل إلى سرعة نهائية ع تتحدد من $ع^2 = 2 ء س$.

فمن ذلك نرى أن ع هى ع أى أن سرعة الجسيم النهائية على المستوى هى السرعة الرأسية لجسيم سمح له بالسقوط نفس المسافة الرأسية من وضع السكون .

٥ ــ ٦ وحدات الوزن ووحدات القوة :

رأينا حسب التعريف ، أن وحدة س • ج • ث للقوة هى الداين . إذن قوة الجاذبية على ١جم هى ٩٨٠ داين (ق = ك ء ، ك = ١ ، ء = ٩٨٠ سم /ث٢). ولسوء الحظ توجد وحدة مشتقة للقوة كثيراً ما تستخدم خارج مجال علم الفيزياء . واسم هذه الوحدة المشتقة هو اسم وحدة الكتل على نظام س • ح • ث . فنحن نتكلم أحيانا بإهمال ونقول : قوة قدرها ١٠٠ جم . وقد تكون هذه قوة زمبرك أو غاز مضغوط أو أية قوة أخرى لا جاذبية . والمقصود بقوة ١٠٠ جم أنها قوة مساوية لقوة الجاذبية على كتلة مقدارها ١٠٠ جم أى تساوى ١٠٠ × ٩٨٠ داين . ولقد نشأت هذه الوحدة من تعود مقارنة جميع القوى بقوى الجاذبية المكافئة لها . ولا محل للالتباس هنا إذا ما تذكرنا ما يأتى :

« الجرام هو وحدة كتلة ، وعندما يستخدم كوحدة قوة لا بد من ضربه فى عجلة الجاذبية للحصول على عدد معبر عنه بوحدة س . ج . ث للقوة » .

وهذا الإجراء عام بصرف النظر عن نوع القوة. إننا نضرب الكتلة فى ء مستخدمين وحدتها للحصول على قيمة للقوة بمدلول وحدة القوة .

مثال ١ : جسم وزنه كيلوجرام تؤثر عليه قوة أفقية مقدارها ٢٥٠ جم . إذا كان الجسم حر الحركة على مستوى أفقى عديم الاحتكاك ، فماذا تكون عجلته ؟ .

المعلومات : القوة المستخدمة ق = ٢٥٠ جم ، وزن الجسم = ١ كم = ١٠٠٠ جم

حـ = ؟

الحل : ينص القانون الثانى « لنيوتن » على أن : ق = ك حـ . القوة المستخدمة ق هى ٢٥٠ جم . بمعنى أنها تساوى تأثير الجاذبية على كتلة ٢٥٠ جم . إذن القوة هى ٢٥٠ × ٩٨٠ = ٢٤٥ ، ٠٠٠ داين . والكتلة المعجلة هى ١٠٠٠ جم (لاحظ أن وزنا مقداره ١٠٠٠ جم هو قوة الجاذبية على كتلة مقدارها ١٠٠٠ جم) .

إذن ٢٤٥ ، ٠٠٠ = ١٠٠٠ حـ .

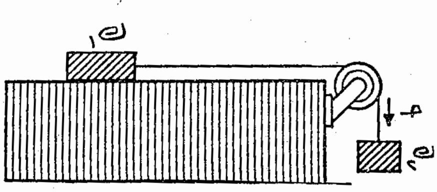
حـ = ٢٤٥ سم / ث^{٢} (الجواب)

مثال ٢ : جسم وزنه كيلوجرام يستقر على منضدة أفقية عديمة الاحتكاك ، مربوط فى خيط يمر على بكرة ، ومتصل بنهاية الخيط من الناحية الأخرى وزن قدره ٢٠٠ جم (شكل ٥ – ٥) . ما هى عجلة ثقل الكيلوجرام ؟

المعلومات : ك$_{١}$ = ١ كم = ١٠٠٠ جم ، ك$_{٢}$ = ٢٠٠ جم

حـ = ؟

الحل : القوة المستخدمة التى تسبب العجلة هى ثقل ٢٠٠ جم . لذا فإن ق = ٢٠٠ × ٩٨٠ داين . والكتلة المعجلة تحوى كلا من الثقلين.



(شكل ٥ – ٥)

إذن

ك = ك$_{١}$ + ك$_{٢}$ = ١٠٠٠ + ٢٠٠ = ١٢٠٠ جم

ق = ك حـ (أو) ٢٠٠ × ٩٨٠ = ١٢٠٠ حـ

حـ = ١٦٣ سم / ث٢

وهذه هى عجلة الثقلين لأنهما يتحركان سويا .

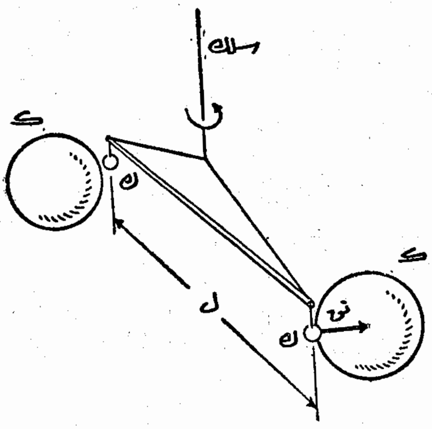
* * *

إن كتلة ١ جم تزن على سطح الأرض أى تؤثر عليها قوة جاذبية قدرها ق = ك ى = ٩٨٠ داين. وإذا تذكرنا أن الجرام عبارة عن جزءين من ألف جزء من الباوند تقريبا (الباوند ٤٥٤ جم) ، رأينا أن الداين فعلا قوة صغيرة جداً ، وهى بالتقريب القوة التى تعادل وزن ورقة البوستة فى ميزان فائق الحساسية . ومعظم القوى العادية التى نصادفها تقاس بملايين الداينات أى بالميجا داين .

وأخيراً يجب أن نلاحظ أن كتلة الجسم مستقلة استقلالا تامًّا عن الجذب التثاقلى ، ولكن وزنه يتناسب مباشرة مع قيمة ى . وهذا معناه أن كتلة قدرها ١٠٠جم مثلا تستمر ١٠٠ جم عند خط الاستواء أو القطبين أو على قمة جبل ، ولكن وزنها يختلف حسب هذه الأماكن . ويمتد الميزان الزمبركى المعلقة فيه كتلة ١٠٠ جم بمسافات مختلفة تتوقف على قيمة ى .

٥ ـ ٧ تجربة كافندش لتقدير قيمة ج :

لا توجد طريقة منفردة لقياس ثابت الجاذبية ج الموجود فى قانون نيوتن (المعادلة ٥ ـ ١) إلا إذا كانت كتلة الأرض معروفة (انظر المعادلة ٥ ـ ٣) ، ولا توجد ثمة طريقة مباشرة لقياس هذه الكتلة الأخيرة . ولذلك لابد من ابتكار وسيلة أخرى لقياس هذا الثابت الهام (ج) . فى عام ١٧٩٨ أعلن كافندش عن تجربة لقياس التجاذب



(شكل ٥ ـ ٦)

التثاقلى مباشرة بين الأجسام ومن ذلك أوجد قيمة لثابت التثاقل أو الجاذبية ج .

وتتلخص تجربته (المبينة فى شكل ٥ – ٦) فيما يأتى : الكتلتان المرموز لهما بالرمز « ك » عبارة عن كرتين صغيرتين من الرصاص مثبتتين على قضيب خفيف من الخشب ل ، ويتعلق القضيب من سلك مثبت فى ماسك . وعند إدخال الكتلتين ك مباشرة إلى الوضع المرسوم، فإن السلك يلتوى بقوة الجاذبية بين كل كرة صغيرة والكرة الكبيرة القريبة منها . تقاس زاوية اللى الحادثة وتترجم إلى قيمة للقوة بوساطة تجربة إضافية تعمل لتدريج التواء السلك ، تتلخص فى جعل الكتلتين ك وحاملهما الخشبي يتذبذبان فى مستو أفقى حر، وقياس عدد الذبذبات الحادثة فى زمن معين . وهناك علاقة رياضية بين معدل هذه الذبذبات والقوة اللازمة للىّ السلك بزاوية معينة . وتساوى قوة التجاذب بين كل كتلتين متقاربتين أى المقدار ج $\frac{ك\ ك}{نق^{٢}}$ من ذلك أمكن حساب ج لأن كلا من ك ، ك ، نق معروفة . والقيمة التى حصل عليها كافندش للمقدار ج لم تكن دقيقة جدا لأن القوى الموجودة بين الكتل المتجاذبة صغيرة جدا ومن الصعب قياس أثرها . وتبين التجارب الدقيقة الحديثة أن قيمة ج هى :

$$ج = ٦{,}٦٧٠ \times ١٠^{-٨} \text{ سم}^{٣} / \text{جم . ث}^{٢}$$

وبالتعويض عن هذه القيمة فى المعادلة (٥ – ٣) وهى

$$ء = ج \frac{ك}{نق^{٢}}$$

حيث ء = ٩٨٠ سم / ث^{٢} ، نق = نصف قطر الأرض فى هذه الحالة = ٦,٣٧ × ١٠^{٨} سم فإنه يمكن إيجاد كتلة الأرض ك وهى

$$ك = \frac{نق^{٢}\ ء}{ج} = \frac{(٦{,}٣٧ \times ١٠^{٨})^{٢} \times ٩٨٠}{٦{,}٦٧ \times ١٠^{-٨}}$$

$$= ٥{,}٩٦ \times ١٠^{٢٧} \text{ جم}$$

أى ٦×١٠^{٢١}طن تقريباً. ويمكن اعتبار هذه الطريقة تجربة مباشرة لقياس كتلة

الأرض . وهى لا تخرج عن كونها قياساً لعجلة الأرض ح = $\frac{ك}{ﮐ}$ ٪ ء الحادثة

بقوة معروفة ق = ج ($\frac{ﮐ ك}{نق^{٢}}$) واستنتاج كتلة الأرض بتطبيق القانون الثانى للحركة .

ملحوظه : رمزنا لكتلة الكرة الكبيرة فى تجربة كافندش ولكتلة الأرض برمز واحد ﮐ ، وهذا لا يجب أن ينشأ عنه التباس لأننا رمزنا لنصف قطر كل منهما برمز مخالف (نق ، نق) .

ومتوسط كثافة الأرض (الكتلة مقسومة على الحجم) من الحساب السابق تساوى

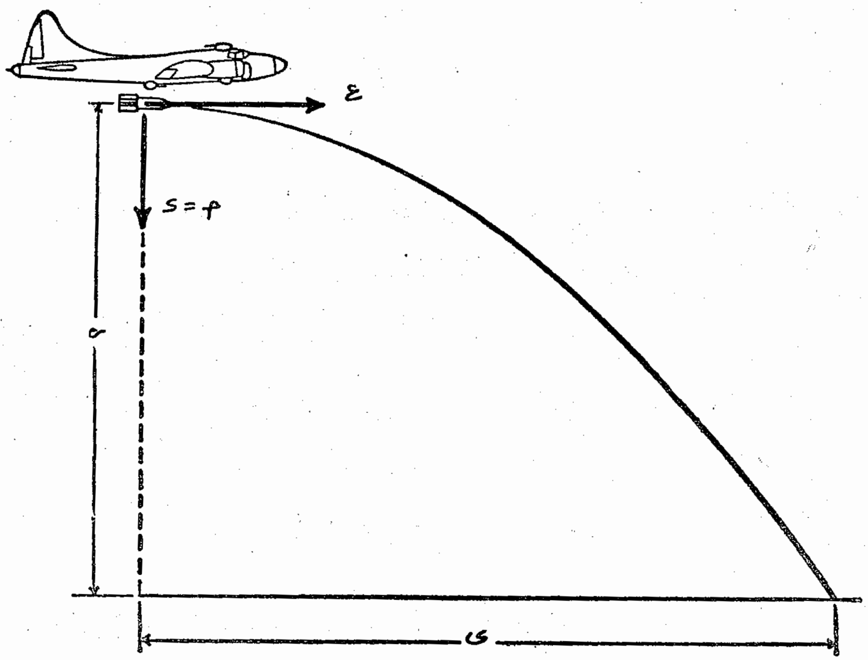
$$\frac{ﮐ}{\frac{٤}{٣} ط نق^{٣}} = ٥{,}٥ \text{ جم / سم}^{٣}$$

وهذا المتوسط لكثافة الأرض أكبر بعض الشيء من المتوسط الذى نحصل عليه بطريقة مباشرة بأخذ عينات كثيرة من سطح الأرض ، مما يدل على أن قلب الأرض مكون من مادة ثقيلة .

٥ ــ ٨ الحركات المركبه ــ القذائف :

إن أى جسيم يقذف بسرعة ابتدائية إلى الأمام وأعلى ، يسلم بمجرد القذف إلى قوة واحدة هى قوة الجاذبية ولكن مساره يكون نتيجة لتركيب حركتين . وكان « جاليليو » أول من أدرك تماما هذه الحركة المعقدة بعض الشيء مما يدل على فهم جيد لقوانين سقوط الأجسام .

يزيد تعقيد الحركة الفعلية للقذائف ــ التى من أمثلتها رصاص البنادق وقنابل المدافع ــ وجود الهواء الجوى ودوران الأرض حول محورها وعوامل أخرى لا محل لذكرها . وسوف نهمل هذه العوامل . وزيادة فى تبسيط الموضوع لتقريب دراسته إلى ذهن الطالب ، نعتبر فقط حالة السرعة الابتدائية الأفقية . ولتصوير الموضوع المبسط نتخذ مثالاله حالة قنبلة تلقيها طيارة تطير فى خط طيران أفقى (شكل ٥ــ٧)



(شكل ٥ – ٧)

والنتيجة المرغوب الحصول عليها هى غالباً المدى (ى) وهى المسافة المقطوعة إلى الأمام مقاسة فى الاتجاه الأفقى . ويتضح مباشرة أن الموضوع يتعلق بحركتين : الحركة الأمامية نتيجة السرعة الابتدائية $ع_0$ المستمرة بانتظام (بإهمال مقاومة الهواء) وهذه تركب مع حركة السقوط الناشئة من قوة الجاذبية . والزمن الذى تستغرقه القذيفة فى الهواء هو زمن السقوط رأسيًّا مسافة ر تمثل الارتفاع . نحصل على هذا الزمن من معادلات السقوط الحر (بند ٥ – ٤) . هنا $ع_0 = 0$. (لا توجد سرعة ابتدائية رأسية) وإذن

$$ر = \frac{1}{2} د ن^2$$

أو $$ن = \sqrt{\frac{2ر}{د}}$$

أثناء هذا الزمن تسير القنبلة إلى الأمام بسرعة أفقية منتظمة $ع_0$ ، والمسافة ى المقطوعة فى الزمن ن هى

$$ى = ع_0 \times ن$$

وبالتعويض عن قيمة ﻫ :

$$ى = ع_{.} \sqrt{\frac{٢ ر}{ء}}$$

(مثال) : طائرة تطير أفقيًّا بسرعة قدرها ٢٤٠ ميل/ الساعة (٣٨٥ كم / الساعة «أو» ١٠٧ م / ث) تلقى قنبلة من ارتفاع ١٠٠٠ م . ما هو الزمن الذى تستغرقه القنبلة فى الهواء وما هو مداها الأفقى ؟

المعلومات : ع. = ١٠٧ م / ث = ١٠٧٠٠ سم / ث

ر = ١٠٠٠ م = ١٠٠ ، ٠٠٠ سم

ﻫ = ؟ ، ى = ؟

الحل : بإهمال مقاومة الهواء (وهو إهمال خطير فى هذه الحالة) .

إذن $ر = \frac{١}{٢}$ ء $ﻫ^{٢}$ (أو) ١٠٠ ، ٠٠٠ = $\frac{١}{٢}$ × ٩٨٠ × $ﻫ^{٢}$

$ﻫ^{٢}$ = ٢٠٤

ﻫ = ١٤,٣ ث

أثناء هذا الزمن تسير القذيفة إلى الأمام بسرعة ١٠٧ م / ث

إذن ى = ع. ﻫ

= ١٠٧٠٠ × ١٤,٣

= ١٥٣ ، ٠٠٠ سم = ١٥٣٠ م (الجواب)

لاحظ أنه ما دمنا نهمل مقاومة الهواء ، فإن المدى يصبح مستقلا عن الكتلة — أى أن القنبلة الكبيرة يكون لها مسار القنبلة الخفيفة .

تمارين

١ — احسب قوة الجاذبية بين كتلتين كل منهما كيلوجرام مركزاهما على بعد ١٠ سم أحدهما من الآخر.

الجواب : ٠,٠٠٠٠٦٧ داين

٢ — كتلة القمر تساوى تقريباً ٧,٥×١٠^٢٥ جم ونصف قطره ١,٧ × ١٠^٨ سم ، ماذا يكون وزنك على القمر ؟

الجواب : ما يقرب من ١/٦ وزنك على الأرض

٣ — جسم يزن كيلوجراما . ما هى قوة الجاذبية عليه ؟

الجواب : ٠,٩٨ ميجا داين

٤ — ما هى القوة اللازمة لإعطاء كتلة قدرها كيلوجرام على نضد أفقى عديم الاحتكاك — عجلة مقدارها ٥٠ سم / ث ؟

الجواب : ٥٠ كيلو داين

٥ — ما هو الزمن الذى يستغرقه جسم يبدأ من حالة السكون لينزلق على مستو مائل عديم الاحتكاك طوله متران وارتفاعه ٥ سم ؟

الجواب : ٤ ث

٦ — كتلة قدرها ٢٠٠ جم مستقرة على نضد أفقى عديم الاحتكاك ، مربوطة بخيط يمر على بكرة ومعلق بنهاية الخيط من الناحية الأخرى كتلة قدرها ٢٠٠ جم . ما هى عجلة المجموعة ؟

الجواب : ٤٩٠ سم / ث^٢

٧ — يمر خيط على بكرة ملساء تماما مثبتة فى السقف . فى أحد طرفى الخيط علقت كتلة ٥٠٠ جم ، وفى الطرف الآخر علقت كتلة قدرها ٧٠٠ جم . إذا سمح للبكرة بالدوران ، فما عجلة المجموعة ؟

الجواب : ١٦٣ سم / ث

٨ – يدخل رجل إلى غرفة مصعد ويقف على ميزان ضغط زنبركى فيجد أن القراءة ٨٠ كجم . إذا صعد المصعد بعجلة منتظمة قدرها ١٠٠ سم / ث^{٢} ، بينما لا يزال الرجل على الميزان ، فما هى قراءة الميزان الجديدة أثناء هذه العجلة ؟ وإذا كانت عجلة المصعد عند الهبوط ١٠٠ سم / ث^{٢} أيضا ، فماذا تكون القراءة ؟

الجواب : ٨٨ كجم ، ٧٢ كجم

٩ – كتلة قدرها ٥٠٠ جم مثبتة فى نهاية خيط طوله ١٠ سم تدور فى مستو رأسى ، بينما نهاية الخيط الأخرى مثبتة . إذا عملت الكتلة دورتين فى الثانية ، فما هى أكبر قوة شد فى الخيط ، وما هى أصغر قوة ؟

الجواب : ١,٢٨ ، ٠,٣ ميجا داين

١٠ – تضرب كرة جولف أفقيا من عند حافة جرف ارتفاعه ١٠٠ م . إذا كانت السرعة الابتدائية للكرة ٢٠ م / ث ، فما الزمن الذى تستغرقه الكرة فى الهواء وعلى أى بعد من قاعدة الجرف تستقر الكرة ؟

الجواب : ٤,٥ ث ، ٩٠ م

مراجع مقترحة للاطلاع

Galileo, "Two New Sciences", New York, The Macmillan Co. , 1914.

ذكرت فى صفحة ١٨١ الآراء الأصلية لجاليليو عن حركة المقذوفات .

Magic W. F., "Source Book in Physics", New York McGraw-Hill Book Co. 1935.

جاء فى الصفحات ١٠٥ – ١٠ مقتطفات من بحث كافندش الأصلى عن قياس ثابت الجاذبية .

Mott-Smith M., "This Mechanical World", New York , D. Appleton & Co. 1931.

يبحث الفصلان الثامن والخامس عشر قانون الجاذبية والتفرقة بين الكتلة والوزن.

Shapley, H. & Howorth H.E., "A Source Book in Astronomy" New York, McGraw-Hill Book Co., 1939.

ورد فى صفحة ٧٧ مقتطفات من كتاب نيوتن عن الجاذبية .

Shapley H. Wright, H. & Rapport S., "Readings in the Physical Sciences", New York Appleton-Century Crofts Inc., 1948.

تشمل الصفحات ١٦١ – ٦٥ عرضا عاما عن الطرق الحديثة لقياس ثابت الجاذبية (ووزن الأرض) .

الفصل السادس

الشغل و بقاء الطاقة

٦ ــ ١ نقاش فى مقدار الحركة :

فى أواخر القرن السابع عشر نشأ نزاع شهير بين جمهرة المشتغلين بالعلم ، وهذا النزاع يختص بالسؤال الآتى : ما هى الصيغة التى تستطيع أن تمثل ، على أحسن وجه ، مقدار الحركة التى يتمتع بها جسم ؟ ونحن ننظر فى عصرنا الحاضر ربما ببعض النقد إلى هذا السؤال شاعرين بأنه لم يكن دقيقا ، وأنه كان يحتاج إلى تعريف الحركة ومقدارها مقدما . لكن لعله من محاسن هذا النزاع أنه قد حوى من العلامات ما يدل على بزوغ فجر جديد على فهمنا لقاعدة من أهم قواعد العلم غزت علم الفيزياء وتغلغلت فى جميع نواحيه كما لم تفعله قاعدة أخرى من قبل ، ألا وهى قاعدة بقاء الطاقة .

بالنسبة لنيوتن كان مقدار الحركة يعنى حاصل ضرب كتلة الجسم وسرعته . وقد أسهم « ديكارت Descartes » أكثر من أى شخص آخر ، فى تدعيم وجهة نظر « نيوتن » . وتتلخص مناقشة « ديكارت » فيما يأتى : يكون لجسمين مقدار الحركة نفسه إذا أثرت عليهما قوتان متساويتان فى هذا القدر من الزمن . فإذا ما سلمنا بهذا أصبح من السهل اشتقاق أن حاصل ضرب كتلة الجسم × السرعة ، مقياس للقوة ، لأنه بفرض وجود قوتين مختلفتين تؤثران على الجسم نفس الفترة الزمنية فإن

$$\frac{\text{ق}_1}{\text{ق}_2} = \frac{\text{ك}_1\text{ح}_1}{\text{ك}_2\text{ح}_2} = \frac{\text{ك}_1\text{ح}_1\text{ن}}{\text{ك}_2\text{ح}_2\text{ن}} = \frac{\text{ك}_1\text{ع}_1}{\text{ك}_2\text{ع}_2}$$

بفرض أن ح العجلة ، ن الزمن . وتصبح ك ع مقياسا للقوة وبالتالى لمقدار الحركة ، حسب رأى « ديكارت » .

وكان أشد المجاهرين بالمعارضة لهذا الرأى « ليبنز Leibnitz » فى ألمانيا الذى لاحظ أن رفع ١ كجم مسافة ٤ م يحتاج للمجهود نفسه (أسماه « قوة ») الذى

يحتاجه ٤ كجم مسافة ١ م . وإذا سمح للجسم فى هاتين الحالتين بالسقوط من الارتفاع الذى وصل إليه ، فإن مربع السرعة هو الذى يتناسب مع الارتفاع ($ع^٢ = ٢ ء ر$) لذا فإن المجهود الذى يبذل لرفعهما يجب أن يقاس بحاصل ضرب الكتلة ومربع السرعة التى يتحرك بها كل منهما عن نهاية الهبوط . هذا من وجهة نظر « ليبنز » هو الذى يجب أن يقيس « مقدار الحركة » . ومن الصعب أن نقدر — فى أيامنا الحاضرة — شدة مثل هذا النزاع . وليس أدل على حدته من مقالة فى صفحتين صدرت عن معسكر ليبنز نقتطف منها الآتى :

« هذه مظاهرة قصيرة النظر من ديكارت وجماعته تختص بالقانون الطبيعى الذى يظنون أن الخالق قد وضعه لحفظ مقدار الحركة نفسه ، والحقيقة أنه يقلب علم الميكانيكا رأسا على عقب » .

وكما يحدث غالبا كان أساس البلبلة اختلاف المصطلحات ، فإن استخدام « ديكارت » للكمية ك ع لقياس مقدار الحركة صحيح لقوة تعمل زمناً معيناً . وإصرار « ليبنز » على اتخاذ الكمية $ك ع^٢$ مقياساً لمقدار الحركة صحيح لقوة تعمل مسافة معينة . وكل من هاتين الكميتين مثمر الفائدة فى علم الديناميكا . الأولى تقيس كمية الحركة ، وسوف نفرد لها الباب التالى ، والثانية مضروبة فى $\frac{١}{٢}$ تقيس طاقة الحركة . على أن المعنى الكامل لكل من هاتين الكميتين لم يفهم إلا بعد ١٥٠ عاما من بدء النزاع . ولم يصبح ضرورياً بالمرة أن يميز علم الديناميكا بين وجهتى النظر المذكورتين ويختار بينهما . بل على العكس هو يشملهما معاً فى وحدة بناء مشتركة . بدأت عملية اشتمالهما تتحقق عندما ظهر أن القوة ليست هى وحدها المفيدة كعنصر أساسى من عناصر تحليل الحركة ، بل الأكثر فائدة هو ما ينشأ من استمرار تأثير القوة على الجسم فى حركته خلال قطعه مسافة معينة . إن هذا التأثير التراكمى للقوة ، قد أمد علم الديناميكا ببصيرة جديدة ، وأتاح لهذا العلم طريقاً سهلا لحل كثير من المسائل الصعبة فى علم الحركة . ومن علامات هذا الطريق ، فهم العلاقة بين الشغل والطاقة .

٦ ـ ٢ الشغل :

يعرف الشغل بحاصل ضرب الإزاحة الحادثة بوساطة قوة تؤثر على جسيم × مركبة القوة الموازية لهذه الإزاحة ، أى أنه قوة × مسافة . وإذا رمزنا للشغل بالرمز ش ، وللازاحة بالرمز ف ، ولمركبة القوة فى اتجاه الإزاحة بالرمز $ق_ف$ ، فإن

$$ش = ق_ف × ف$$

ويجب التنبيه إلى أن مركبة القوة $ق_ف$ فى اتجاه ف هى التى تستخدم فى حساب الشغل . وبديهى أنه إذا كان الجسم غير مقيد فى حركته ، وكانت حركته ناشئة من استخدام قوة مفردة ، فإن الإزاحة تحدث فى اتجاه القوة ، وتسهم القوة كلها فى الشغل المبذول . أما إذا قيد الجسم بحيث يتحرك مائلا بزاوية مع اتجاه القوة ، فإن الشغل يكون أقل من حاصل ضرب القوة الكلية فى الإزاحة ، حيث إن مركبة القوة $ق_ف$ هى التى تؤثر فى اتجاه الإزاحة .

والشغل كمية غير متجهة ، ولو أن هذا لا يتضح من التعريف ، فعند تهذيب أرض منبسطة مزروعة بالحشائش لا يهم فى أى اتجاه تسير آلة الحصد لقص الحشيش ، فمساواة ٥٠ قدما من الشرق إلى الغرب يحتاج إلى الشغل نفسه الذى يحتاجه مساواة ٥٠ قدما من الشمال إلى الجنوب . ولو أنه ليس للشغل اتجاه إلا أن له إشارة بمعنى أن يكون موجباً أو سالباً . إذا كانت الإزاحة ف فى نفس اتجاه القوة ق على الجسم فإن الشغل يكون موجبا . وإذا كانت فى الاتجاه المضاد كان الشغل سالبا . (لأن الجسم فى هذه الحالة هو الذى يبذل الشغل) . فمثلا لإقامة جسم بالحركة ، فإننا نبذل شغلا موجباً على الجسم ، لأننا نمد الجسم بقوة $ق_ف$ تكون فى اتجاه المسافة المقطوعة ف . وإذا أردنا إيقاف الجسم ، فإننا نحبس عنه القوة التى نمده بها ونتركه وشأنه لتتولى قوة أخرى تعمل من تلقاء نفسها دون مجهود إيقافه ، فيقال إننا بذلنا شغلا سالبا على الجسم بمعنى . . أن الجسم هو الذى تولى بذل هذا الشغل . وقوة الاحتكاك من النوع المضاد للحركة دائما ، ولذا تصاحب الشغل السالب .

وتدل كلمة « شغل » على معانى كثيرة يمدنا بها القاموس . ولكن فى علم الفيزياء ليس لها إلا معنى واحداً . فالشخص الذى يحمل ثقلا قدره ٥٠ « باوند » وهو ساكن مكانه ساعات متتالية يستطيع أن يقول إنه كان يشتغل . ولكن من ناحية الفيزياء هو لم يعمل شغلا على الإطلاق لأنه لم يحرك الثقل ضد قوة الجاذبية . وهذا معناه أن التعب العضلى لا يدخل فى دائرة الشغل الديناميكى .

الوحدات : يمكن الحصول على وحدة الشغل بالطريقة المعتادة . وهى فى نظام س . جـ . ث عبارة عن داين . سم (لاحظ أنها داين × سم ، وليست داين / سم) ويسمى الداين . سم إرجا ، وهناك وحدة مشتقة منه كثيرة الاستخدام تسمى چولا ، وهى ٠٠٠ ، ٠٠٠ ، ١٠ أو ($١٠^{٧}$) إرجا . لذا فإن :

الإرج هو الشغل، الذى تبذله قوة مقدارها ١ داين خلال مسافة قدرها ١ سم ، الچول هو $١٠^{٧}$ إرج .

مثال ١ :

ما هو الشغل الواجب بذله لرفع ثقل قدره ١٠ كجم ارتفاعا قدره ٣ أمتار ؟

المعلومات : الوزن = و = ١٠ كجم = $١٠^{٤}$ جم ، ر = ٣ م = ٣٠٠ سم .

الحل : ش = ق ف × ف (هنا القوة « الوزن » موازية للمسافة الرأسية ر)

إذن ق ف = ق = ك ء = $١٠^{٤}$ × ٩٨٠ داين

ف = ر = ٣٠٠ سم

ش = $١٠^{٤}$ × ٩٨٠ × ٣٠٠

= ٢٩٤ × $١٠^{٧}$ إرج

= ٢٩٤ چول (الجواب)

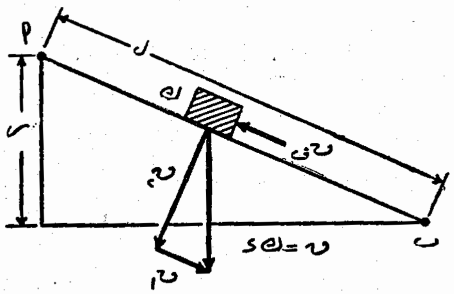
مثال ٢ :

قوة موازية لمستو مائل عديم الاحتكاك تدفع كتلة ك إلى أعلى المستوى بسرعة ثابتة . احسب الشغل المبذول فى تحريك الكتلة من ب إلى ا (شكل ٦ — ١) .

المعلومات : و = ك ء ، ف = ل

ش = ؟

الحل : السبب فى أن شغلا يجب أن يبذل يرجع إلى حقيقة الحال ، وهو أن الثقل المراد تحريكه يرفع ضد قوة الجاذبية . ومن الواضح أن القوة الناشئة من وزن الجسم ليست موازية للمستوى المائل ، ولذا من اللازم إيجاد مركبة ق = ك ء فى اتجاه المستوى . هذه هى



(شكل ٦ — ١)

ق ١ فى الشكل . وحيث إنه لا يوجد عجلة أو احتكاك ، فإن القوة المستخدمة يجب أن تساوى بالكاد ق ١ ، أى أن ق ق = ق ١ . لذا فإن ش = ق ١ × ل . ولكن كما لاحظنا من قبل فى حالة المستوى المائل يتشابه مثلث القوى مع المثلث الحادث بالمستوى المائل .

$$\text{إذن} \quad \frac{ق_١}{ك\,ء} = \frac{ر}{ل}$$

$$\text{أو} \quad ق_ق = ق_١ = \frac{ر}{ل}\, ك\,ء$$

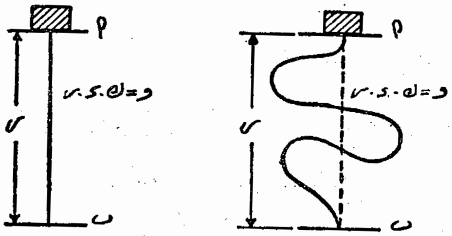
$$\text{،} \quad ش = ق_ق \times ل = \frac{ر}{ل}\, ك\,ء\,ل$$

$$ش = ك\,ء\,ر \quad \text{(الجواب)}$$

أى أنه إذا لم يوجد احتكاك فإن الشغل اللازم لرفع الكتلة إلى أعلى المستوى بسرعة منتظمة ، هو الشغل نفسه اللازم لرفعها رأسيا بمعدل منتظم .. أى أن الشغل الذى يحتاجه الجسم لينتقل من ب إلى ا بالرفع الرأسى هو نفسه الذى يحتاج إليه بالدفع على المستوى ، ولكن القوة اللازمة ليست متساوية فى الحالتين . إذ أنه ، والجسم على المستوى ، نحتاج إلى ما يساوى مركبة الوزن أى ق ق $= \left(\frac{ر}{ل}\right)$ ك ء

وهذا يوضح السبب فى أنه باستخدام المستوى المائل نحتاج إلى قوة أقل مما تلزم

لرفع الجسم رأسيا ، ويعبر عن هذه الحقيقة أحياناً بأن : الفائدة الميكانيكية للمستوى المائل تساوى $\frac{\text{ر}}{\text{ل}}$.

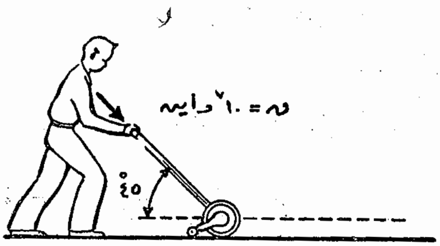


(شكل ٦ — ٢)

إن التحليل الذى أجريناه فى المثال ٢ يسمح بالتعميم : الشغل المبذول ضد الجاذبية يتوقف فقط على المسافة الرأسية للمسير، أما المسير نفسه فشكله لا يهم (شكل ٦ — ٢) ويتضح هذا من تذكر أن الجاذبية قوة رأسية ، ولذا فإن الشغل يعمل ضد الجاذبية بوساطة المركبة الرأسية للقوة المستخدمة ، وهذه المركبة تؤثر بطول المسافة ر . إن طريق صعود المنحنى خلف الجبل ، قد يكون أقل تعبا من التسلق الرأسى ، ولكننا لا نوفر شغلا بالمعنى الفيزيائى للكلمة .

مثال ٣ :

فى تهذيب حشائش الحدائق بوساطة الآلة المعدة لذلك والمبينة فى شكل فى شكل (٦ — ٣) ، يعمل شخص بقوة قدرها ١٠ ملايين داين فى اتجاه اليد . إذا كانت اليد تصنع زاوية ٤٥° ، ما هو الشغل الذى يبذله الشخص فى تهذيب شريط طوله ١٠ أمتار.



(شكل ٦ — ٣)

المعلومات : ق = 10^{7} داين ؛ θ = ٤٥° ، ف = 10^{3} سم

ش = ؟

الحل : بنظرية فيثاغورث :

$$\text{ق}_{\text{ف}} = \frac{\text{ق}}{\sqrt{2}} = \frac{10^{7}}{\sqrt{2}} \text{ داين}$$

$$\text{ش} = \text{ق}_{\text{ف}} \times \text{ف}$$

$$= \frac{{}^{٧}١٠ \times {}^{٣}١٠}{\sqrt{٢}} \text{ إرج}$$

$$= ٧٠٧ \text{ چول (الجواب)}$$

مثال ٤ : سيارة وزنها ١٠٠٠ كجم تتحرك أفقيا بسرعة ١٠ أمتار / ث توقفت فى مسافة ٢٠ مترا باستخدام قوة احتكاك ثابتة، ما قيمة هذه القوة، وما مقدار الشغل المبذول على السيارة لإيقافها ؟

المعلومات : ك = ١٠٠٠ كجم = ${}^{٦}١٠$ جم ، ع. = ١٠ م/ ث = ${}^{٣}١٠$ سم/ث.

ع = ٠ ، ف = ٢٠ م = ٢ × ${}^{٣}١٠$ سم

ق = ؟ ، ش = ؟

الحل : من اللازم إيجاد عجلة التقصير ، المعادلة ٣ ـ ٣ :

$$\text{ع}^{٢} = \text{ع}_{.}^{٢} + ٢ \text{ حـ ف}$$

$$= ({}^{٣}١٠)^{٢} + ٢ \text{ حـ} \times ٢ \times {}^{٣}١٠$$

، حـ = ـ ٢٥٠ سم / ث^{٢}

إذن ق = ك حـ = ـ ${}^{٦}١٠$ × ٢٥٠ = ـ ٢,٥ × ${}^{٨}١٠$ داين

ش = ق ف = ـ ٢,٥ × ${}^{٨}١٠$ × ٢ × ${}^{٣}١٠$ = ـ ٥ × ${}^{١١}١٠$ إرج

= ـ ٥ × ${}^{٤}١٠$ چول (الجواب)

ويلاحظ أن الشغل المبذول لإيقاف الجسم سالباً دائما .

٦ ـ ٣ الطاقة :

إذا رفع ثقل من الأرض إلى سطح المنضدة ، فإن شغلا يبذل للتغلب على جاذبية الأرض له . وإذا أزيحت المنضدة وسقط الثقل ، فإنه يستطيع عمل شغل على أى جسم فى مسير سقوطه . وملخص القول أنه برفع الجسم نكون قد أكسبناه خاصية لم تكن لديه قبل رفعه ، وهى القابلية على عمل شغل ، وهذه القابلية مشتقة من وضعه . وهناك مثال آخر مخالف فى النوع وإن أدى إلى المعنى نفسه يتعلق بإدارة القرص ذى الكرة والأرقام (الروليت) ، الذى حتما يحتاج إلى شغل لإدارته ، وإذا ما دار يستطيع أن يعمل شغلا على أى جسم فى طريقه ، معناه أن القرص

قد اكتسب خاصية لم تكن له من قبل ، ومن الضرورى بحث هذه المقدرة أو القابلية الجديدة فى كلا المثالين لأهميتها الفائقة فى الطبيعة (رأينا أن هذا كله محور النقاش فى نزاع ديكارت — ليبنز) .

وتسمى القدرة على عمل شغل بالطاقة . وإذا ظهرت الطاقة على هيئة حركة —فعلية أو ممكنة— سميت الطاقة بالطاقة الديناميكية. والمثالان السابقان نوع منها . وهناك صيغ أخرى للطاقة فمثلا توجد خاصية يتميز بها الديناميت من شأنها أن تسبب تمدداً ضخماً أى انفجاراً ، وهذه الخاصية راجعة إلى الطبيعة الجزيئية للديناميت وتسمى طاقة كيموية . والقضيب المعدنى عندما يسخن يتمدد ويضغط على أى عائق يمنعه من التمدد ، وهذه طاقة حرارية . وسوف ندرس طرقا « تفنى » فيها المادة فتتحول إلى كميات هائلة من الطاقة الديناميكية ، وهذه حالة كتلة وطاقة معاً . وقائمة أنواع الطاقة لابد أن تكون طويلة لأن هناك شواهد كثيرة على قدرتها على عمل شغل .

٦ — ٤ الطاقة الديناميكية (طاقة الوضع وطاقة الحركة) :

يتلخص غرضنا الحالى فى بحث الطرق الممكنة لإكساب جسيم طاقة — ويمكن الكشف عن هذه الطاقة فيما بعد بمقدار الحركة التى يستطيع الجسم إحداثها . إن المناقشة التى أثرناها فى بند (٦ — ٣) كانت تحتوى على مثالين . فى الأول منهما رفعنا ثقلا إلى علو ما فأكسبناه قدرة على عمل شغل بالنسبة لوضعه الجديد ، وتسمى المقدرة على عمل شغل بالنسبة للوضع بطاقة الوضع . وحيث إن المقدرة على عمل شغل بالنسبة للوضع هى طاقة تكمن فى الجسم ولا يعملها الجسم فعلا ، فإنها تسمى أحيانا بالطاقة الكامنة . ومقدار طاقة وضع الجسم هو الشغل الذى لابد من عمله لإعطاء الجسم وضعه الجديد ، لذا فإن

ش = قن × ف = ك . ء . ر

الطاقة الكامنة = ك . ء . ر

وحيث إن الطاقة هى المقدرة على عمل شغل ، فإن وحداتها يجب أن تكون هى

وحدات الشغل نفسه ، . أى الإرج ، أو الجول .

والمثال الثانى الذى ذكرناه فى بند (٦ — ٣) ، كان يتعلق بلعبة القرص الدائر ذى الأرقام والكرة . إن القرص الدائر يستطيع عمل شغل لأنه متحرك . وتسمى القابلية على عمل شغل بسبب الحركة بطاقة الحركة . ولحساب طاقة الحركة التى يمتلكها جسم بفضل حصوله على سرعة ع ، لا بد من حساب الشغل المبذول على الجسم لإعطائه هذه السرعة . لنختار للسهولة حالة جسم يتحرك فى خط مستقيم . من الواضح أنه لكى يتحرك الجسم لابد أن تؤثر عليه قوة ، وهذه القوة تكسبه عجلة . فإذا كانت ف هى المسافة المقطوعة ليحصل على السرعة ع فإن

$$ش = ق \times ف = ك . ح . ف$$

وباستخدام المعادلة (٣ — ٦)

$$ع^{٢} = ٢ ح ف \quad أو \quad ح ف = \frac{ع^{٢}}{٢}$$

$$إذن \quad ش = ك \left(\frac{ع^{٢}}{٢} \right) = \frac{١}{٢} ك ع^{٢}$$

$$لذا فإن طاقة الحركة = \frac{١}{٢} ك ع^{٢}$$

(وبإهمال العامل $\frac{١}{٢}$ ، فإن هذا هو التعبير الذى ساقه « ليبنز » فى مناقشته الشهيرة ، بند ٦ — ١) . ومن المناسب عند هذا الحد مراجعة وحدة طاقة الحركة بصرف النظر عن تأكيدنا ، بأن وحدتها يجب أن تكون هى وحدة الشغل نفسها .

$$وحدة طاقة الحركة = جم \cdot (سم / ث)^{٢} = جم \times \frac{سم}{ث^{٢}} \times سم$$

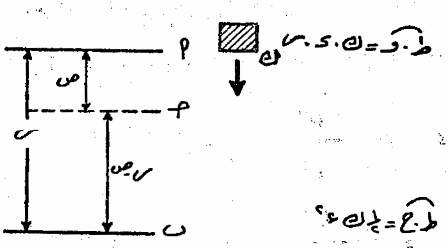
$$= داين . سم = إرج$$

٦ — ٥ بقاء الطاقة الديناميكية :

لكى نرفع كتلة ك من ب إلى ا شكل (٦ — ٤) ، لابد من بذل شغل على الكتلة . يظهر هذا الشغل على شكل طاقة وضع $\widehat{ط . ق}$ للجسم المرفوع . وعندما

تسقط هذه الكتلة ، فإنها تصير قادرة على عمل شغل بالنسبة لطاقة حركتها ط . ح .

ويضطرنا المنطق أن نسأل الآن هذا السؤال : هل نحصل من الكتلة على الشغل نفسه الذى أكسبناه إياها ؟ عندما كانت فى الوضع ا فإنها تكون قد اكتسبت طاقة وضع هى ط . و = ك . ى . ر ، ولايكون لها طاقة



(شكل ٦ — ٤)

حركة لوجودها فى حالة سكون عند ا . وعندما يسمح لها بالسقوط نسأل أنفسنا ما هى الطاقة الديناميكية التى تختص بها عند مرورها بالنقطة حـ . من الواضح أن طاقة وضعها قد نقصت إلى ك . ى . (ر — ص) وأن لها الآن طاقة حركة بسبب سرعتها عند النقطة حـ الناشئة من تحركها مسافة ص تحت تأثير الجاذبية بعجلة ى .

إذن ع^{٢} = ٢ حـ ف = ٢ . ى . ص

ط . ح = ½ ك ع^{٢} = ½ ك (٢ . ى . ص) = ك . ى . ص

أى أن ط . ح المكتسبة تساوى تماما ط . و المفقودة ، أى أن مجموع الطاقتين لم يتغير . أخيراً عندما تصل ك إلى المستوى ب فإنها تكون قد فقدت كل ما تملكه من ط . و . وحيث إن ط . ح عند ب تخضع للصيغة ½ ك ع^{٢} وحيث أن

ع^{٢} = ٢ حـ ف = ٢ . ى . ر

فإنه عند ب ط . ح = ½ ك ع^{٢} = ½ ك (٢ . ى . ر) = ك . ى . ر

ويمكن تلخيص ما سبق على الصورة الآتية :

عند ا ش = ط . و + ط . ح = ك . ى . ر + ٠ = ك . ى . ر

عند حـ = ط . و + ط . ح = ك . ى (ر — ص) + ك . ى . ص = ك . ى . ر

عند ب = ط . و + ط . ح = ٠ + ك . ى . ر = ك . ى . ر

ولكى نلقى على المقصود ضوءاً أكبر نرجع بالقارئ إلى موضوع المستوى المائل المطروق كثيرا (انظر شكل ٦ —١) . لنفرض أن الكتلة ك تنزلق إلى أسفل المستوى من ا إلى ب . بطول المستوى العديم الاحتكاك ، تكون القوة

$$\text{ق}_{\text{ف}} = \frac{\text{ر}}{\text{ل}} \,.\, \text{ك} \,.\, \text{ء} = \text{ك} \,.\, \text{حـ}$$

إذن

$$\text{حـ} = \frac{\text{ر}}{\text{ل}} \times \text{ء}$$

عند ب $\quad \text{ع}^{2} = 2\,\text{حـ ف} = 2\left(\frac{\text{ر}}{\text{ل}} \times \text{ء}\right) = 2 \,.\, \text{ء} \,.\, \text{ر}$

عند ب $\quad \widehat{\text{ط.ح}} = \frac{1}{2}\,\text{ك ع}^{2} = \frac{1}{2}\,\text{ك}\,(2 \,.\, \text{ء} \,.\, \text{ر}) = \text{ك} \,.\, \text{ء} \,.\, \text{ر}$

ولكن هذه هى طاقة الوضع عند ا . لذا فإن

$$\widehat{\text{ط.و}}\ \text{عند ا} = \widehat{\text{ط.ح}}\ \text{عند ب}$$ بإهمال الاحتكاك .

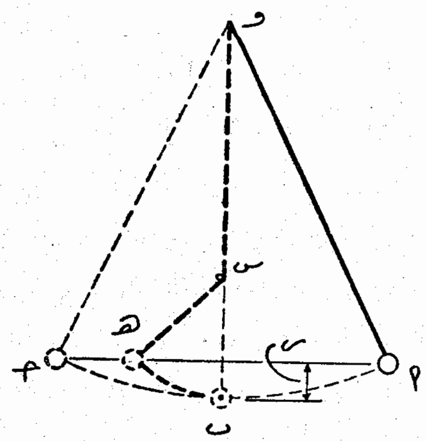
ولقد وصلنا إلى مثل هذه النتيجة من قبل . لذا نستطيع أن نقرر باطمئنان أن مجموع الطاقات الديناميكية يظل ثابتاً . وهذا يكون حقيقيا إذا لم ندخل فى اعتبارنا سوى الأرض والكتلة المنجذبة إليها ، لأننا إذا أدخلنا مقاومة الهواء ، أو أية قوة أخرى مثل ريح جانبية على الكتلة الساقطة ، فإن النتيجة التى وصلنا إليها لا تكون صحيحة إلا إذا اتسع نظامنا بحيث يشمل القوى الجديدة . ويمكن إعادة هذا القول من جديد ، بأن نسجل أننا نتعامل مع نظام منعزل (الأرض والكتلة) ، وهو نظام خال من جميع القوى الخارجية . وبالقيد المذكور ، يمكننا أن نعمم نتائجنا بشكل قانون يعرف باسم قانون الطاقة الديناميكية نصه :

القيمة الكلية للطاقة الديناميكية (حركة وطاقة وضع) فى نظام منعزل تظل ثابتة بمرور الوقت .

والنظام المنعزل يسمى بالنظام المحافظ ، لأن الطاقة تحتفظ فيه بقيمتها .

مثال : اعتبر حركة كرة بندول (شكل ٦ — ٥) تهتز من ا إلى حـ خلال المسار ا ب حـ . عند ا تكون الكرة لحظيا فى حالة سكون وكل طاقتها طاقة وضع .

من الواضح أن ط . و هذه هى ك . ء . ر فقط ، حيث ر هو الارتفاع الرأسى للنقطة ا فوق ب . عند ب تكون الكرة قد استنفدت طاقة وضعها واكتسبت — حسب قانون البقاء — قيمة مساوية من طاقة الحركة . وعندما تصل الكرة إلى حـ تتحول الطاقة مرة أخرى ، فى هذه الحالة من طاقة حركة إلى طاقة وضع . لذا فإننا إذا أهملنا الاحتكاك نجد تبادلا مستمرا بين طاقة الوضع وطاقة الحركة يتكرر كلما أعاد البندول حركته .



(شكل ٦ — ٥)

والآن نسأل السؤال الهام الآتى : إلى أى ارتفاع تصل كرة البندول إذا وضعنا فجأة أثناء الحركة دبوسا مثبتا لخيط البندول عند س أثناء مرور الكرة بالنقطة ب متجهة إلى اليسار ؟ إن وضع الدبوس المشار إليه يجعل طول البندول قصيرا فى الجزء الأيسر من اهتزازاته بعد ب . قبل إدخال الدبوس (س) ، فإن النظام المحافظ الذى أمامنا يتكون من البندول ، ونقطة تثبيته ، والأرض (بإهمال الاحتكاك) . والآن يجب أن يتسع هذا النظام ليحتوى على الدبوس (س) الذى يستطيع إدخال قوة تعترض البندول . فى هذا النظام الأخير ، كما فى النظام الأول ، يجب أن تحتفظ الطاقة بقيمتها بمعنى أن ط . ع عند ب يجب أن تساوى ط . و عند ا . وأن تكون ط . و عند هـ (وهى نقطة السكون اللحظى للبندول القصير) مساوية ط . ح عند ب .

لذا نصل إلى النتيجة الصريحة الآتية : ط . و عند هـ يجب أن تساوى ط . و عند ا ، وتصعد الكرة إلى الارتفاع نفسه كما لو كان الدبوس غير

موجود . وهذه نتيجة لا يصل إليها الإنسان من أول وهلة . بمحاولة اعتبار مثل هذه المواضيع المثيرة قد استطاع « جاليليو » النفاذ ببصيرته إلى طبيعة الطاقة الديناميكية .

٦ ــ ٦ القوى المبددة :

توضح الأمثلة المذكورة سابقاً قانون بقاء الطاقة الديناميكية . وقد رأينا أنه لابد لتطبيقه من قيد خاص . هذا القيد هو أنه يجب اعتبار النظام الموجود منعزلا ، بمعنى التأكد من عدم وجود قوى خارجية تؤثر على الأجسام الموجودة داخل النظام . لأنه إذا كانت هذه القوى الخارجية موجودة ، فإنها فى العادة تعمل شغلا أو تمتص طاقة عندما تؤدى الأجسام حركتها داخل النظام ، ولا يصبح المجموع طاقة حركة + طاقة وضع ثابتا بمرور الوقت . ولكن إذا وسعنا حدود النظام بحيث يشمل الأجسام التى تسبب وجود هذه القوى الخارجية ، فإن هذه القوى الخارجية تصبح قوى داخلية فى النظام الجديد ، وفى هذه الحالة ينطبق قانون بقاء الطاقة على النظام . على أنه يوجد نوع خاص من القوى الخارجية متعب جداً ، ولا يمكن إزالة تأثيره بتوسيع رقعة النظام . وهذه هى القوى المسماة بقوى الاحتكاك ، وهى قوى مبددة بمعنى أنها تمتص طول الوقت طاقة ديناميكية من النظام الذى يحتويها . ولا يوجد نظام ديناميكى خال تماماً من هذه القوى المبددة ، والنتيجة . . أن الطاقة الديناميكية تستنزف باستمرار مع الحركة . لذلك لابد من إضافة قيد جديد على استخدام قانون بقاء الطاقة الديناميكية . هذا القيد هو أن تكون القوى المبددة غير موجودة على الإطلاق . وطبيعى أن نجد أنفسنا مقادين لوضع السؤال الآتى : هل من الممكن أن يتسع القانون ليحتوى الطاقات الممتصة من النظام بوساطة القوى المبددة ؟ إن الإدراك الحقيقى للإجابة بكلمة نعم على هذا السؤال لم يتم إلا حديثاً ، ومن مدة لا تزيد كثيراً عن مائة عام .

٦ ــ ٧ عدم فناء الطاقة :

لكى تتسع حدود قانون بقاء الطاقة الديناميكية بحيث تشمل جميع أنواع الطاقات ، ويصبح القانون قانون بقاء الطاقة بصفة إطلاقية عامة ــ كان من اللازم

استلهام أدلة تجارب كثيرة عملت على مقياس شاسع سوف نتولى شرحها فى أحد أجزاء الكتاب المقبلة . وإنما يكفى حالياً تدوين نتيجة هذه الأدلة مقدماً وعكس طريقة الوصول من المشاهدات ، خطوة فخطوة ، حتى القانون — بعرض القانون مباشرة وتعزيزه بالأدلة والشواهد . إننا سوف نعكس الطريقة الاستقرائية التى اتبعت فى الوصول إلى القانون (دون سند لنا من التاريخ أو المنطق) كحيلة منا لتبسيط المناقشة فى باقى هذا الكتاب . يعرف هذا القانون الممتد العام باسم قانون بقاء الطاقة (عموما) أو عدم فنائها ، وينص على ما يأتى :

« فى أى نظام منعزل يظل مجموع قيم جميع أصناف الطاقة ثابتا بمرور الوقت — ولو أن قيمة أى صنف منها قد تتغير » .

وبعبارة أخرى أقل استضاءة فى العرض : « إن الطاقة لا يمكن فناؤها كما لا يمكن استحداثها » أى أن المقدار الكلى يظل ثابتاً . وبدون شك يعتبر قانون بقاء الطاقة هذا أعم القوانين عن جدارة فى تاريخ العلم . إن صيغة « جميع أصناف الطاقة » تبعد القانون تلقائيًّا عن نطاق الإثبات المرغوب ، لأنه كيف يمكن الجزم بأننا قد عملنا حساب كل طاقة فى النظام الموجود ؟ وهل نستطيع الادعاء بأننا قد ألممنا وحصرنا جميع أنواع الطاقة فى الوجود ؟ الواقع أننا لا نعرف . ولكننا نعتنق مبدأ قانون البقاء عن عقيده راسخة ، حتى إنه عندما يبدو أن ظاهرة جديدة تدل على ضياع جزء من الطاقة الكلية ، يخترع الفيزيائى فى الحال نوعاً جديداً من الطاقة ليحتفظ القانون بصيغته العامة . وقد دلت جميع القرائن ، حتى الآن ، على أن هذه الأنواع الجديدة تكتشف فيما بعد فعلا . وليس أدل على ذلك بصفة عامة من أن نظريتين هامتين جديدتين تعتنقان مبدأ بقاء الطاقة ، برغم ما أدخلتاه من ثورة على آرائنا العلمية ، الأولى هى النظرية النسبية التى أدخلت تعديلا على الديناميكا النيوتونية فى أحوال متطرفة ، والثانية هى نظرية الكم التى عدلت آراءنا عن تبادل الطاقة .

ويمكننا أن نشير الآن إلى العامل أو العنصر الجديد الذى أدخل على دراسة الديناميكا ، فأمكن بوساطته تعميم قانون البقاء . هذا العامل هو إمكان تحول الطاقة

الديناميكية إلى نوع آخر من الطاقة . وأظهر مثل على هذا هو الطاقة المبددة بالاحتكاك . هذه الطاقة تتحول إلى نوع جديد يسمى بالحرارة . فأى نظام يحتوى على قوى احتكاك تستنزف طاقته الديناميكية ، لابد أن نفتح أعيننا على تولد الحرارة فيه . إن طريقة التبديد هذه هى أكثر الطرق شيوعا . وبالرغم من هذا فإن كثيراً من النظم يحافظ على طاقته الديناميكية إلى حد كبير ، مما يشجعنا على أن ندخل من حين إلى آخر تعابير مثل « إهمال الاحتكاك » أو عديم الاحتكاك لأجل أن نصل إلى حل مقرب . وهناك طرق أخرى مبددة أقل شيوعا ، إذا أهملناها يضعف تقريبنا لاستخدام قانون البقاء العام . ونذكر على سبيل المثال أننا إذا هيأنا احتكاكاً مباشراً بين حجر الصوان والصلب ، لا تنشأ حرارة فقط من الاحتكاك ، بل يصاحب ذلك ظهور ضوء وصوت . هذه القوى المبددة الأخيرة صغيرة ويمكن إهمالها .

٦ ــ ٨ اضمحلال الطاقة :

سوف ننهى المناقشة فى هذا الموضوع بتعليق مختصر عن كفاءة التبادل الطاقى (نسبة إلى طاقة) واضمحلال الطاقة . ولو أنه ليس لفتح هذا الموضوع الأخير علاقة بالفيزياء الذرية ، ولكنه ربما يفيد فى تعزيز أهمية مفهوم الطاقة من الناحية العلمية .

نحن نعيش فى عالم مملوء ومحاط بأنواع كثيرة من الطاقة ، فمن المهام الكبرى الملقاة على عاتق المشتغلين بالعلم الوصول إلى فهم صحيح لهذه الأنواع ، وكيفية إجراء التبادل من نوع منها إلى الآخر . ويتلخص الموضوع فى الوصول إلى طريقة فعالة لتحويل نوع شائع من الطاقة إلى نوع آخر قد يكون أكثر قابلية للاستخدام فى الأغراض الإنسانية .

ولكى نوضح ما نعنى سوف نرجع بخطواتنا إلى التحولات الطاقية اللازمة للحصول على ضوء من مصباح كهربى . سوف نهمل جميع العمليات النوعية من صنع للفتيلة (سلك التوهج) أو الزجاج ونركز اهتمامنا على سلاسل التحولات الطاقية المسئولة مباشرة عن الضوء . لكى يعمل المصباح كمصدر ضوئى لابد أن تسخن الفتيلة إلى درجة حرارة كافية . تنشأ الطاقة الحرارية والطاقة الضوئية معاً (ولا حيلة لنا فى هذا ،

من مرور الالكترونات فى الفتيلة المعدنية ، ويتحول ١٠ ٪ من طاقة حركة هذه الالكترونات إلى ضوء ، بينما يتحول ٩٠ ٪ من طاقتها إلى حرارة . ولكى نكسب الالكترونات طاقة لابد من إدارة مولد كهربى فى مكان ما . وإذا فرضنا أن هذا المولد من نوع التربينات المائية ، فإن طاقة الدوران هذه تأتى من سقوط الماء . وأخيراً فإن الماء المنحدر يكتسب طاقة حركة نتيجة لطاقة الوضع التى نشأت من تبخر الماء فى مستوى سفلى معين وتكاثفه (على شكل مطر) فى مستوى أعلى وقد تمت عملية التبخر أساساً بتأثير عامل الحرارة الشمسية فأولى حلقات هذه السلسلة وآخرها هى « الحرارة » . والحقيقة أنه لا يوجد ابتداء بالمعنى الحقيقى للكلمة ، كما أنه لا يوجد انتهاء فعلى ، لأننا قد نسأل ما الذى يسبب حرارة الشمس ، وإلى أين تذهب حرارة المصباح .

وكيفما تتبعنا تحولات الطاقة نصادف دائماً إحدى صيغها على شكل حرارة . والصفة الغالبة على ما نصادفه هو ضياع طاقة ديناميكية وظهورها على شكل حرارة . وأقرب الأمثلة على ذلك ، أنه فى حالة المصباح يذهب أكثر من ٩٠ ٪ من طاقة التيار الألكترونى المار فى الفتيلة إلى حرارة . وسوف نرى فى الباب التاسع أن الحرارة ما هى إلا مسمى آخر لطاقة الحركة الجزيئية . عندما يسخن جسم فإن الجزيئات المفردة فى الجسم يزيد نصيبها من طاقة الحركة . ولكن الجزيئات كثيراً ما تفقد الزائد فى طاقة حركتها عن طريق تصادمها مع الجزيئات الأبطأ منها بعملية تسمى عملية انتقال الحرارة أو انسيابها . لذا فمن المستحيل نظرياً أن يحتفظ الجسم داخله بفائض كبير من طاقة الحركة الجزيئية إذا كان لما يجاوره من الأجسام نصيب بالنسبة لمتوسط ما يخص الجزىء من هذه الطاقة . وإذن لابد من انسياب الحرارة ، وانسياب الحرارة يبدد الطاقة ، كما أنه لا توجد وسيلة فعالة لقلب هذا الانسياب الحرارى . . بمعنى أن يكون فى إمكاننا زيادة نصيب ما يخص جسم من الحرارة — أى تركيزها فيه — على حساب ما يحيط به من الأجسام الأبرد منه . حقيقة أنه توجد آلات حرارية تعمل هذا ، ولكنها تحتاج إلى وجود قوى خارجية لإتمام هذه العملية . وحتى عندما تفعل الآلات هذا تكون كفاءة تحويلها ضعيفة فى تركيز هذه الحرارة .

بالرغم من هذا لايوجد ما يمنعنا من أن ننظر حولنا ونسأل عما إذا كانت هناك وسيلة طبيعية ، أو عامل يركز الحرارة لنا بدلا من أن يتركها تتبدد إلى الأجسام المجاورة .

إن نتيجة هذا البحث فى الطبيعة لم تؤد إلى وجود هذه الوسيلة . والحقيقة أنه يوجد قانون هام لم يحاول أحد إخضاعه لحيز البرهان ، ولكن بالرغم من هذا لم تحدث إلى الآن عملية واحدة فى الوجود تثبت خطأه ، يسمى بالقانون الثانى للديناميكا الحرارية . ينص هذا القانون على ما يأتى : من المستحيل بدون مساعدة قوى خارجية نقل حرارة من جسم بارد إلى جسم أسخن منه . وبعبارة أخرى ، فإن أىّ طاقة ديناميكية تبدد إلى طاقة حرارية تفقد إلى الأبد كطاقة ديناميكية . وقد ضربنا مثلاً بالطاقة الديناميكية لانتشارها كأحد أنواع الطاقة الهامة . إن الطاقة الحرارية التى تتحول إليها هذه الطاقة الديناميكية تنتشر فى مادة النظام الموجود ، وفى غيره من الأجسام المجاورة ، ولا توجد وسيلة البتة لاستعادتها ، إلا إذا استعنا بطاقة ديناميكية أخرى باستخدام آلة حرارية . تسمى هذه الظاهرة بظاهرة اضمحلال الطاقة . وهى تفيد أن الطاقة تضمحل إلى مستويات تكون أقل صلاحية وفائدة للعمل فيها ولعله قد طرأ فى ذهن كثير من الناس أن مياه المحيطات — وهذه حقيقة — تحتوى على كميات هائلة من الطاقة الحرارية ، فإذا ما وجدت وسيلة لخفض درجة حرارتها ولو ببضع درجات لأمكن الحصول على كميات كبيرة من الطاقة . إن القانون الثانى للديناميكا الحرارية يمنع هذا ، إذ يحتم استهلاك طاقة خارجية لنقل جزء من الطاقة من المستوى الحرارى المنخفض إلى مستوى حرارى أعلى ، فالعملية إذن كبيرة التكاليف قليلة الكفاءة . وبهذا الوضع فإن معظم الطاقة التى تحتويها أرضنا غير قابلة للاستخدام المفيد ، ولا يمكن الجزم بأن ما اكتشف حديثاً من قابلية تحول المادة إلى طاقة قد ساعد فى حل هذا الموضوع .

٦ — ٩ القدرة :

من المعروف أنه لكى نعجل بسيارة من سرعة قدرها ١٠ أميال / الساعة إلى سرعة ٥٠ ميل / الساعة فى زمن قدره ١٠ ثوان نحتاج إلى محرك أقدر مما نحتاج

مراجع مقترحة للاطلاع

Mach, E . ,"Popular Science Lectures" Chicago, Open Court Publishing Co., 1895.

ورد فى الصفحات ١٣٦ – ٨٥ عرض نقدى لمبدأ ثبوت الطاقة .

Magic, W., "Source Book in Physics" New York, McGraw-Hill Co., 1935.

جاء فى صفحة ٥١ مقتطفات من آراء ليبنز عن طاقة الحركة .

Mott-Smith, M., "This Mechanical World", New York, D. Appleton & Co., 1931.

كتب الباب ١٧ عن الطاقة الديناميكية بطريقة مبسطة .

Shapley, H., Wright, W., Rapport, S., "Readings in Physical Sciences" New York , Appleton Century Crofts, 1948 .

ورد فى صفحة ٣٠٤ عرض عن الطاقة فى صورها المختلفة .

Swarm, W. F. G., "The Architecture of the Universe" New York, The Macmillan Co., 1934.

الباب الخامس هو عرض شيق عن الآراء الخاصة بالطاقة واضمحلالها .

الفصل السابع

كمية الحركة وبقاؤها

٧ ــ ١ حدود الطاقة كمفهوم ديناميكى :

إن الأهمية العظمى لمفهوم الطاقة ترجع إلى خاصية بقائها . وهى خاصية ليست قاصرة على الطاقة الديناميكية وحدها ، بل تشاركها فيها جميع صور الطاقة فى الكون . إن قانون البقاء هو تعميم يشمل العالم الفيزيائى بأكمله ، وكما ذكرنا فى الباب السابق لا يوجد برهان خاص لهذا القانون ، وإنما تكمن قوته فى أن أية عملية فى الوجود لم تشاهد خارجة عليه . وإذا كان النظام الوجودى الذى نشاهده لا يحوى إلا قدرا قليلا من القوى المبددة ، فقد رأينا أنه يمكن قصر هذا القانون العام على قانون يتعلق بالعمليات الديناميكية وحدها . ولا يغيب عن الذهن أن دراسة التبادل الديناميكى للطاقة فى أى نظام هو عملية ناجحة لتحليل الحركات فى هذا النظام .

ولكن بما أن الطاقة كمية غير متجهة ، فإن تطبيقها فى مسائل الحركة يترك أحد الخواص الهامة للحركة بدون تعيين وهذه الخاصية هى التى تتعلق باتجاه الحركة . ويحتاج إكمال وصف الحركة إلى كمية موجهة تنطبق عليها قاعدة البقاء مثل الطاقة تماماً . وفى جميع المسائل التى تهم فيها الناحية الكمية فقط للحركة يكون قانون بقاء الطاقة كافياً . أما إذا أردنا معالجة الأنظمة التى يكون فيها اتجاه الحركة ذا أهمية فيجب الرجوع فيها إلى كمية ديكارت الشهيرة ك ع فى نزاع ديكارت ليبنز ، وهى النصف الآخر المكمل فى هذا النزاع المعروف .

٧ ــ ٢ كمية الحركة وبقاء كمية الحركة :

تعرف كمية حركة جسيم بحاصل ضرب كتلته وسرعته ، ويرمز إلى هذه الكمية بالرمز μ . إذن

$$\vec{\mu} = \text{ك}\ \vec{\text{ع}}$$

وكمية الحركة كمية متجهة، لأن $\overleftarrow{ع}$ كمية متجهة ، وهى مضروبة فى كمية غير متجهة ك . وحيث إن كمية الحركة تعتمد على السرعة فهى كمية ديناميكية . وسوف نبرهن باستخدام قوانين نيوتن للحركة أنه فى أى نظام ديناميكى لابد أن تحتفظ كمية الحركة بقيمتها ، شأنها فى ذلك شأن طاقة الحركة نفسها . وكمية الحركة لا يمكن أن تفقد من حركة ديناميكية إلى أخرى ، لأنه لا توجد صيغ أخرى يمكن أن تتحول إليها كمية الحركة ، وهو أضيق نطاقاً من قانون بقاء الطاقة . وقانون بقاء كمية الحركة ليس قابلا للاستخدام فى الحركات الديناميكية فقط ، ولكنه يمدنا بطريقة سهلة ومضبوطة لدراستها . وعندما ينطبق قانون البقاء على الطاقة الديناميكية ، فإنه يمكن استخدام القانونين معاً كأداة قوية للحل .

البرهان على بقاء كمية الحركة : إن قانون بقاء طاقة الحركة هو بطبيعته مفهوم استقرائى . على الضد من هذا سوف نعالج قانون بقاء كمية الحركة على أنه مفهوم استنباطى ونستنتجه من قوانين الحركة « لنيوتن » . والقانون ينطبق فى أى نظام يحتوى على أى عدد من الجسيمات . للسهولة نعتبر جسمين فقط ، الأول نرمز له بالدليل ١ ، والثانى نرمز له بالدليل ٢ . لنفرض أن هناك نوعاً من القوى يعمل بين الجسمين ، ولنتصورها على هيئة لولب اتصال ، أو قوى جاذبية ، أو على هيئة مجهولة بين الجسمين . إن القيد الوحيد الذى سوف نفرضه هو أن هذه القوى داخلية ، أى ناشئة من داخل النظام المحتوى على الجسمين ، وسوف نفرض أن النظام منعزل بمعنى أنه لا توجد قوى خارجية تؤثر على الجسمين . وبما أنه لا توجد قوى خارجية ، فإن النظام يكون فى حالة توازن ، ولذا يمكننا أن نكتب

$$ك_١ \overrightarrow{ح_١} + ك_٢ \overrightarrow{ح_٢} = \text{صفرا}$$

وكمية الحركة الكلية للنظام هى المحصلة الموجهة لكميتى حركة الجسمين .

أى أن $\overrightarrow{\mu} = ك_١ \overrightarrow{ع_١} + ك_٢ \overrightarrow{ع_٢}$ . . . . . . (٧ – ١)

ولنفرض أنه بالنسبة لحدوث تصادم أو أى سبب آخر تتغير سرعة الجسمين . فهل تتغير كمية الحركة الكلية للنظام ؟ أم هل تكون كمية الحركة الكلية النهائية مساوية لكمية الحركة الكلية الابتدائية (بمعنى بقاء كمية الحركة) ؟

لنفرض مؤقتاً أن كمية الحركة تتغير إلى قيمة جديدة ω ناشئة من السرعتين الجديدتين $\overrightarrow{\text{ع}'_{1}}$ ، $\overrightarrow{\text{ع}'_{2}}$.

$$\text{إذن } \omega = \text{ك}_{1}\,\overrightarrow{\text{ع}'_{1}} + \text{ك}_{2}\,\overrightarrow{\text{ع}'_{2}} \quad \ldots\ldots \quad (٧-٢)$$

وبطرح المعادلة (٧ — ٢) من المعادلة (٧ — ١) والقسمة على الزمن ، فإن الطرف الأيمن يدل على معدل التغير الزمنى لكمية الحركة :

$$\frac{\mu - \omega}{\text{ن}} = \text{ك}_{1}\,\frac{\overrightarrow{\text{ع}_{1}} - \overrightarrow{\text{ع}'_{1}}}{\text{ن}} + \text{ك}_{2}\,\frac{\overrightarrow{\text{ع}_{2}} - \overrightarrow{\text{ع}'_{2}}}{\text{ن}}$$

$$= \text{ك}_{1}\,\overrightarrow{\text{ح}_{1}} + \text{ك}_{2}\,\overrightarrow{\text{ح}_{2}}$$

ولكن حسب المعادلة (٧ — ١) فإن شرط النظام المنعزل هو :

$$\text{ك}_{1}\,\overrightarrow{\text{ح}_{1}} + \text{ك}_{2}\,\overrightarrow{\text{ح}_{2}} = \text{صفرا}$$

$$\text{إذن } \frac{\mu - \omega}{\text{ن}} = \text{صفرا}$$

أى أن معدل التغير الزمنى لكمية الحركة = صفرا . وهذا مكافئ لقولنا إن كمية الحركة لا تتغير بمرور الزمن فى أى نظام منعزل . وإذن نكون قد توصلنا إلى برهنة قانون بقاء كمية الحركة وهو :

« كمية الحركة الكلية لنظام من الجسيمات منعزل عن القوى الخارجية يظل ثابتاً بمرور الزمن » .

إن القوى الداخلية والحركة قد تعدل من توزيع كمية الحركة بين الجسيمات ، ولكن كمية الحركة الكلية لا تزيد ولا تنقص . لاحظ جيداً أن المقصود بكمية الحركة الكلية هو المجموع الموجه لكميات الحركة .

٧ ـ ٣ القوة وتغيرات كمية الحركة :

قد بينا فى بند (٧ ـ ٢) أنه إذا كانت القوى الخارجية على النظام معدومة ، فإن كمية الحركة الكلية للجسيمات لا تتغير . فمن الواضح إذن أنه إذا وجدت قوى فإن كمية الحركة تتغير . ولذا لابد من وجود علاقة بين القوة وكمية الحركة .

لنعتبر جسما واحدا كتلته ك يؤثر عليه بقوة $\overrightarrow{\text{ق}}$. حسب القانون الثانى « لنيوتن » :

$$\overrightarrow{\text{ق}} = \text{ك}\ \overrightarrow{\text{ح}}$$

$$= \text{ك}\ \frac{\overrightarrow{\text{ع}'} - \overrightarrow{\text{ع}}}{\text{ن}} = \frac{\text{ك}\ \overrightarrow{\text{ع}'} - \text{ك}\ \overrightarrow{\text{ع}}}{\text{ن}} \quad . . . (٧ - ٣)$$

حيث ع سرعة الجسم عندما يكون الزمن ن = ٠ ، $\overrightarrow{\text{ع}'}$ سرعته عند زمن ن.
تدل المعادلة (٧ ـ ٣) على أن القوة تساوى التغير فى كمية الحركة مقسوما على الزمن اللازم للتغير . وهذه هى صيغة أخرى للقانون الثانى « لنيوتن » : معدل التغير الزمنى لكمية حركة الجسم يساوى القوة الخارجية المؤثرة عليه . يمكن جعل هذا المنطوق ينطبق على حالة نظام يحتوى على عدد من الجسيمات التى يؤثر بعضها على بعض . فى هذه الحالة ينطبق قانون البند (٧ ـ ٢) الخاص ببقاء كمية الحركة ، الذى يمكن اعتباره الحالة الخاصة التى تكون فيها القوى الخارجية = صفرا .

٧ ـ ٤ مسائل التصادم ـ التصادم المباشر (أو الأمامى) :

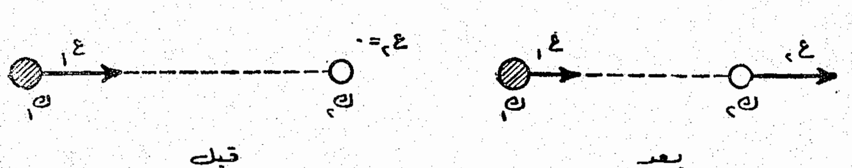
يعتبر التصادم أحد الطرق الشائعة التى بوساطتها يتعدل توزيع كمية الحركة بين الجسيمات فى أى نظام . وقانون بقاء كمية الحركة ينطبق مباشرة على أمثال هذه المسائل .

يمكن تقسيم التصادم بين جسمين إلى نوعين : (١) تصادم مباشر وهو الذى تقع فيه كل الحركة الحادثة فى الخط المستقيم نفسه ، (ب) تصادم جانبى وهو الذى يعمل فيه مسارا الجسمين قبل التصادم ، زاوية أحدهما مع الآخر خلاف

زاوية الصفر. وسنعتبر كلا من هذين النوعين من التصادم على حدة. ولكننا سنعالج التصادم المباشر وحده بتفصيل. وقد ميزنا بين نوعين من التصادم حسب اتجاه الحركة. ومن الضرورى التمييز بين نوعين آخرين من التصادم على أساس الطاقة الديناميكية للنظام. ومن أجل ذلك لابد أن ندخل تعبيرين جديدين فى موضوع التصادم: ١ — التصادم المرونى — وهو الذى يحدث عندما تكون الطاقة الديناميكية المفقودة صفرا، ٢ — التصادم اللامرونى — وهو الذى يحدث عندما تقل القيمة الكلية للطاقة الديناميكية (ط.ح + ط.و) نتيجة لعملية التصادم، ويظهر هذا النقص على شكل صيغة أخرى من الطاقة مثل حرارة أو انبعاج أو ضوء أو صوت. وإذا كانت الطاقة الديناميكية تقل فى هذا النوع من التصادم، فإن المجموع الكلى لجميع الطاقات فى أى نظام منعزل يظل ثابتاً. وإذا كانت القوى الأخيرة المبددة مهملة فإننا نعتبر التصادم مرونيا إلى درجة كبيرة من الصحة: مثلا التصادم بين كرات البلياردو أو كرات من الصلب هو تصادم مرونى إلى حد كبير.

الحالة الأولى: التصادم المرونى المباشر:

اعتبر جسيما ذا كتلة $ك_{1}$ وسرعة $ع_{1}$ يصدم جسيما آخر كتلته $ك_{2}$ فى حالة سكون ($ع_{2}$ = صفرا) •، بعد التصادم مباشرة يتحرك الجسيمان بسرعات جديدة $ع'_{1}$، $ع'_{2}$ (شكل ٧ — ١). تقاس السرعات الموجبة إلى اليمين بينما تقاس السرعات السالبة إلى اليسار.



(شكل ٧ — ١)

وبتطبيق قانون بقاء كمية الحركة وهو:

كمية الحركة قبل التصادم = كمية الحركة بعد التصادم

نجد أن $ك_{1}ع_{1}$ + صفر = $ك_{1}ع'_{1}$ + $ك_{2}ع'_{2}$ . . . . (٧ — ٤)

حيث إن التصادم مرونى فرضاً، فإن الطاقة الديناميكية (ط . ح فى هذه الحالة) تحتفظ بقيمتها :

ط . ح قبل التصادم = ط . ح بعد التصادم

$\frac{1}{2}$ ك$_1$ع$_1$^{2} + صفر = $\frac{1}{2}$ ك$_1$ غ$_1$^{2} + $\frac{1}{2}$ ك$_2$ غ^2 . . (٧ — ٥)

إذا وجدنا ع$_1$ من المعادلة (٧ — ٤) وعوضنا بها فى المعادلة (٧ — ٥) لإيجاد ع$'_1$ فإن

$$ع'_1 = ع'_2 \frac{ك_1 - ك_2}{٢ ك_1} \quad . . . . (٧ - ٦)$$

وإذا وجدنا ع$'_1$ من المعادلة (٧ — ٤) وعوضنا بها فى المعادلة (٧ — ٦) فإننا نحصل على علاقة أخرى مفيدة هى :

$$ع_1 = ع'_2 \frac{ك_1 + ك_2}{٢ ك_1} \quad . . . . (٧ - ٧)$$

وحيث إن ع$'_2$ يجب أن تكون موجبة فى التصادم المباشر ، لذا نجد من المعادلة (٧ — ٦) أن هناك ٤ مواقف ممكنة يمكن أن تتخذها غ$_1$:

١ — عندما تكون ك$_1$ أكبر من ك$_2$ (كرة بلياردو تصدم بلية) : تدل المعادلة (٧ — ٦) على أن ع$'_1$ موجبة وأن كرة البلياردو تتبع الكرة الصغيرة، ولكن بسرعة أقل .

٢ — عندما تكون ك$_1$ أصغر من ك$_2$ (بلية تصدم كرة بلياردو) : حيث إن (ك$_1$ — ك$_2$) كمية سالبة فإن ع$'_1$ تكون إلى اليسار ، وهذا معناه أن الكرة الصغيرة ترتد إلى الخلف بعد التصادم .

٣ — عندما تكون ك$_1$ تساوى ك$_2$ (كرتان متماثلتان من كرات البلياردو) : (ك$_1$ — ك$_2$) = صفرا لذا فإن ع$'_1$ = صفرا ، وهذا معناه أن الكرة الأولى تقف تماما وتحمل الكرة الثانية طاقة الحركة التى حملتها الكرة الأولى (المعادلة

٧ – ٥) . ومثل هذا التصادم المباشر بين كتلتين متماثلتين قد لعب دورا هاما فى اكتشاف النيوترون (الباب ٢٦) .

٤ – عندما تكون ك_{1} صغيرة جداً بجانب ك_{2} (بلية رومان) تصدم لوحا ثقيلا من الحديد : إذا أهملنا ك_{1} بالنسبة إلى ك_{2} فى بسط المعادلة (٧ – ٧) فإننا نحصل على :

$$2\,\text{ك}_{1}\,\text{ع}_{1} = \text{ك}_{2}\,\text{ع}'_{2} \quad \text{(تقريبا) . . . . (٧ – ٨)}$$

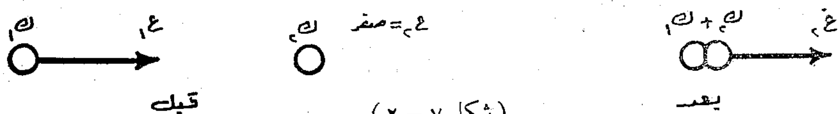
أى أن $\text{ع}'_{2}$ تكون صغيرة جدا بالنسبة إلى ع_{1} (بالنسبة $\frac{2\,\text{ك}_{1}}{\text{ك}_{2}}$) . ومن المعادلة (٧ – ٤) :

$$\text{ك}_{1}\,\text{ع}_{1} + \text{ك}_{1}\,\text{ع}'_{1} = \text{ك}_{2}\,\text{ع}'_{2}$$

وبمقارنة المعادلة الأخيرة بالمعادلة (٧ – ٨) نجد أن $\text{ع}'_{1} = -\text{ع}_{1}$ ، أى أن الكرة ترتد بنفس سرعة الاقتراب . ومن المعادلة (٧ – ٨) نجد أن كمية حركة لوح الصلب بعد التصادم تصبح ضعف كمية حركة الكرة الساقطة عليه . وهذا الموقف يكاد ينطبق تماما عندما يصطدم جزىء الغاز مع جدار الإناء الحاوى للغاز . وهذه نتيجة سوف نستخدمها فى الباب التاسع .

الحالة الثانية : التصادم اللامرونى المباشر :

هذه تصادمات – كما يدل الاسم – لا تحتفظ فيها الطاقة الديناميكية بقيمتها . وأبسط مثل يمكن أن نعالجه هو التصادم المباشر الذى لا يرتد فيه الجسم المصطدم بالمرة . ولكن بدلا من هذا يلتصق بالجسم المصطدم معه ، مثل رصاصة ضربت فى كتلة من الخشب أو كرة من الصلصال قذفت إلى حائط . وفى مثل هذه الحالات لا تتبع الطاقة الديناميكية قانون البقاء أما كمية الحركة فتتبعه ، إذ لا توجد صيغة أخرى يمكن أن تتحول إليها كمية الحركة سوى كمية الحركة نفسها . إذا التصق الجسمان معاً (شكل ٧ – ٢) فإن :



(شكل ٧ – ٢)

$$ك_1 ع_1 = (ك_1 + ك_2) ع_2 \qquad (٧ - ٩)$$

ولو أن طاقة الحركة لا تتبع قانون البقاء ، إلا أنه يمكن حساب طاقة الحركة التى يحتفظ بها النظام بعد التصادم هكذا :

$$\widehat{ط.ح} \text{ قبل التصادم} = \frac{1}{2} ك_1 ع_1^2$$

$$\widehat{ط.ح} \text{ بعد التصادم} = \frac{1}{2} (ك_1 + ك_2) ع_2^2$$

وبإيجاد النسبة :

$$\frac{\widehat{ط.ح} \text{ بعد}}{\widehat{ط.ح} \text{ قبل}} = \frac{\frac{1}{2} (ك_1 + ك_2) ع_2^2}{\frac{1}{2} ك_1 ع_1^2}$$

وباستخدام العلاقة (٧ – ٩) تختزل هذه إلى :

$$\frac{\widehat{ط.ح} \text{ بعد}}{\widehat{ط.ح} \text{ قبل}} = \frac{ك_1}{ك_1 + ك_2}$$

وحيث إن $\frac{ك_1}{ك_1 + ك_2}$ أقل من الواحد الصحيح ، فإن طاقة الحركة بعد التصادم لابد أن تكون أقل من طاقة الحركة قبل التصادم ، ويظهر النقص فى الطاقة بين الأجسام المتصادمة على شكل طاقة تشويه ، أو حرارة (مع كمية صغيرة من الصوت ، وربما ضوء) .

ولا يوجد سوى القليل يمكن أن نذكره فيما يختص بديناميكية التصادمات اللامرونية . ومن الأهمية بمكان فى دراسة الفيزياء الذرية إيجاد الكيفية والصيغة التى تتحول بهما طاقة الحركة مع عدم بقائها . بالبحث وراء هذا النقص ، سوف تكتشف الوسائل التى يمكن أن تعطى بها طاقة داخلية للذرة ونواتها .

٧ – ٥ تصادمات الانزلاق أو المماسية :

الأغلب أن معظم التصادمات بين الجسيمات انزلاقية . ويتطلب قانون بقاء كمية الحركة أن يكون المجموع المتجه لكميات الحركة متساوياً ، قبل التصادم وبعده

شكل (٧ ــ ٣) بصرف النظر عن المسيرات المفردة للجسيمات . وإذا كان التصادم مرونيًّا ، فإن قانون بقاء الطاقة الديناميكية ينطبق أيضًا. وتحليل مثل هذه التصادمات الانزلاقية يحتاج إلى حساب المثلثات ــ وسوف نفادى الدخول فى تفاصيله . إلا أن هناك حالة جديرة بالاعتبار ، هى عندما يكون التصادم بين جسيمين متساويى الكتلة . هذه يمكن أن تحلل تحليلا مباشرًا بالطريقة الآتية : نرمز بالرمز ع˙ إلى السرعة بعد التصادم بدلا من ع التى تدل على السرعة قبله . من قانون بقاء كمية الحركة ،

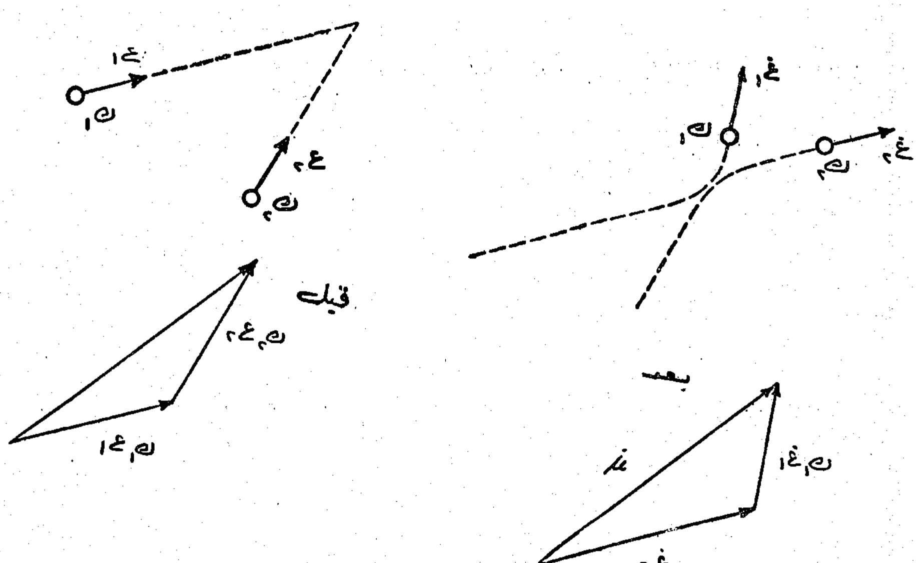
$$\overrightarrow{\text{ك ع}_1} = \overrightarrow{\text{ك ع}'_1} + \overrightarrow{\text{ك ع}'_2}$$

$$(\text{أو}) \qquad \overrightarrow{\text{ع}_1} = \overrightarrow{\text{ع}'_1} + \overrightarrow{\text{ع}'_2} \qquad \ldots\ldots \quad (\text{٧} - \text{١٠})$$

وحيث إن التصادم مرونى ،

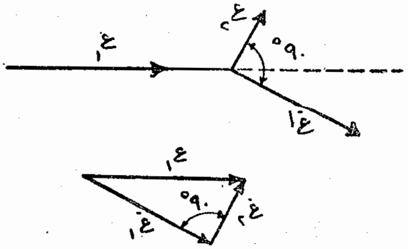
$$\tfrac{1}{2}\,\text{ك}\,\overrightarrow{\text{ع}_1}^{\,2} = \tfrac{1}{2}\,\text{ك}\,\overrightarrow{\text{ع}'_1}^{\,2} + \tfrac{1}{2}\,\text{ك}\,\overrightarrow{\text{ع}'_2}^{\,2}$$

$$(\text{أو}) \qquad \overrightarrow{\text{ع}_1}^{\,2} = \overrightarrow{\text{ع}'_1}^{\,2} + \overrightarrow{\text{ع}'_2}^{\,2} \qquad \ldots\ldots \quad (\text{٧} - \text{١١})$$



(شكل ٧ - ٣)

وتدل المعادلة (٧ – ١١) على أن مثلث المتجهات الذى تتضمنه المعادلة (٧ – ١٠) يجب أن يكون قائم الزاوية (بنظرية فيثاغورث). ومن الممكن أن يمثل هذا شكل (٧ – ٤) أى أنه عندما يصدم جسم متحرك جسماً ساكناً له الكتلة نفسها، فإن الكتلتين ترتدان على مسارين متعامدين (شكل ٧ – ٤) وتتوزع السرعة



(شكل ٧ – ٤)

بأى نسبة تتفق والمعادلتين (٧ – ١٠)، (٧ – ١١) وتعتمد فقط على درجة التماس. هذا فى حين أن التصادم المباشر يجعل $ع'_1$ = صفرا، ويضغط المثلث لجعل $ع_1 = ع'_2$، وعندما يكون التصادم أكثر انزلاقاً، فإن $ع'_1$ تأخذ قيما أكبر فأكبر، حتى إذا ما أصبح التصادم جانبيًّا تقريباً فإن $ع_2$ تعادل صفراً تقريباً، وأكثر التصادمات احتمالا عند التصويب العشوائى هى التى ينشأ عنها أن $ع'_1 = ع'_2$. فى هذه الحالة يكون مثلث كمية التحرك قائم الزاوية بزاويتى ٤٥°.

٧ – ٦ معلومات أكثر عن التصادم :

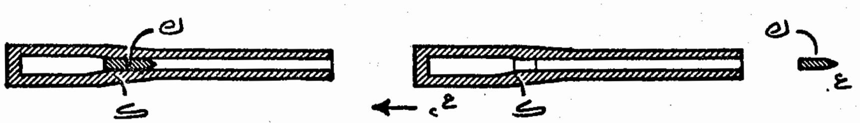
عندما نتكلم فى العادة عن تصادم نتصور تلامساً بين جسمين ماديين. إلا أنه لا يوجد فى نظرية بقاء كمية الحركة ما يحتم القرب الشديد بين الأجسام المتصادمة، ولا ما يشير إلى طبيعة القوى التى تعمل بينها. فهناك من القوى ما يؤثر على الكتل من بعد مثل قوى الجاذبية. ولا شك أن المذنب يتأثر بالقوة الجاذبة للشمس من قبل تقاربه معها بوقت طويل، ومن النادر أن يتلامس مثل هذين الجسمين. والطريف أنه فى مثل هذه الأحوال تنطبق أيضًا قاعدة بقاء كمية الحركة، ولو أنه لا يحدث « تصادم » فعلى عند التقارب. ومن النادر فى مجال الفيزياء الذرية أن يحدث تلامس بين الجسيمات المتصادمة، لأنه توجد فى العادة مجالات كهربية قوية وقوى ذرية من نوع خاص تجعل الجسيمات تحجم عن التصادم الفعلى: فجزىء الغاز الذى يصدم جدار الإناء الحاوى يرتد عنه وبينه وبين الجدار مسافة

تقارن بقطر الجزىء ، والدقائق المتناهية فى السرعة المستخدمة فى تحويل الذرات، وإكسابها نشاطا إشعاعيًّا تتشتت قبل أن تصل إلى أهدافها النووية ، ومن النادر تغلغلها إلى النواة نفسها . والألكترونات البطيئة أثناء سيرها بين ذرات الغاز تنحرف عن مساراتها المستقيمة بوساطة الذرات وهى على أبعاد منها أكبر من أقطار الذرات الحارفة مرات كثيرة . كل هذا يحدث ويعتبر من قبيل التصادم ، وفى جميع هذه الأحوال تنطبق قاعدة بقاء كمية الحركة كما لو كان التلامس قد حدث .

٧ – ٧ المدافع والصواريخ :

قد يكون الانتقال صارخاً من الذرات إلى الصواريخ ، ولكن حركة هذه الأخيرة يمكن وصفها أيضاً بقاعدة بقاء كمية الحركة . من المألوف فى الفيزياء الذرية قياس طاقة دقيقة نووية مقذوفة من نواة من تقدير كمية حركة النواة القاذفة . بالكيفية نفسها يمكن تقدير سرعة قذيفة من قياس كمية حركة ارتداد المدفع الذى أطلقها .

لنعتبر مدفعا معدًّا للإطلاق ، فى حالة سكون بالنسبة للأرض شكل (٧–٥). كمية حركة هذا المدفع وقذيفته صفر قبل إطلاق القذيفة . لذا فإن كمية الحركة



(شكل ٧ – ٥)

الكلية يجب أن تكون صفراً أيضاً بعد الإطلاق . وإذا تصورنا أن القذيفة تقذف إلى اليمين بسرعة ع$_{١}$ ، فإن المدفع يرتد إلى اليسار بسرعة ع$_{٢}$ ، حيث

صفر = ك ع$_{١}$ – ک ع$_{٢}$

أو ك ع$_{١}$ = ک ع$_{٢}$

إذن ع$_{٢}$ = $\frac{\text{ك}}{\text{ک}}$ ع$_{١}$

وللتطبيق على هذا القانون سوف نعتبر المثال الآتى ، الذى ينطبق على أحد البنادق المعروفة :

كتلة الرصاصة = ك = ١٨٠ حبة = ٠,٠٢٥٧ باوند

سرعة الرصاصة عند الفوهة = $ع_١$ = ٢٦٩٠ قدم / ث

كتلة البندقية = ك = ٩,٥ باوند

$ع_٢ = \frac{٢٦٩٠ \times ٠,٠٢٥٧}{٩,٥}$ = ٧,٣ قدم / ث = ٢,٢ م / ث .

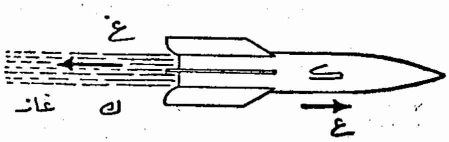
هذه هى سرعة ارتداد البندقية إذا لم تتخذ الاحتياطات لإخمادها . وإذا أدت كتف ماسك البندقية هذا الغرض ، فإن سرعة الارتداد تقل بالنسبة لكتلته والاحتكاك بين قدمه والأرض . إن « ردة » البندقية الخلفية الفجائية ما هى إلا العجلة الخاطفة الناشئة من سرعة ارتدادها عندما تترك الرصاصة فوهتها . وفى بعض البنادق يعمل على التقليل من سرعة الارتداد بجعل قاعدة البندقية ترتكز على زنبرك ، مما يطيل من زمن العجلة ويقلل من قوة الدفع المقابلة لكمية حركة ارتداد معينة .

إن موضوع السفر بالصواريخ موضوع شائق ، لأنه يتيح استخدام قاعدة بقاء كمية الحركة فى مجال جديد . فى بند (٧ — ٢) أثبتنا هذا القانون بفرض أن نظام الجسيمات الموجود يعانى تغيرات فى السرعة فقط . ولما كانت كمية الحركة عبارة عن حاصل ضرب الكتلة والسرعة ، فإن اشتقاقنا لهذا القانون الهام كان ممكنا إذا فرضنا أن الجسيمات كانت تعانى تغيرات فى الكتلة والسرعة معاً (ولو أن الاشتقاق فى هذه الحالة أكثر صعوبة) .

وكتطبيق على القاعدة العامة نعتبر موضوع المحرك الصاروخى أو النفاث . فإن قدرة هذا المحرك على الدفع تعتمد على كمية حركة الارتداد الناشئة من انطلاق نافورة غازية فائقة السرعة من فتحة فى ذيل الصاروخ . من أجل هذا الغرض يهيأ الغاز بحيث يعانى ضغطاً كبيراً ناشئاً من اشتعال وقود أو مفرقع ، ويسمح له بالتمدد بالانسياب من فتحة آخذة فى الضيق لكى يصل إلى سرعة كبيرة عند تركه لنهايتها . ويحمل الصاروخ بالأكسجين اللازم للاشتعال . وحيث إن الارتداد لا يعتمد بأية

حال على وجود الهواء الجوى ، فإن الصواريخ تطير بكفاءة تامة فى طبقات الجو العليا حيث مقاومة الهواء أقل ما يمكن . ويبشر الصاروخ بإمكان وجود وسيلة للسفر بين الكواكب . وتستخدم الطائرات النفاثة أكسجين الهواء الجوى للاشتعال ، ولكنها تعمل بالقاعدة نفسها .

ويمكن الحصول بسهولة على المعادلات الأولية المستخدمة فى الطيران بالصواريخ. لذلك نستخدم الرموز الآتية (انظر شكل ٧ — ٦) .



(شكل ٧ — ٦)

ك = كتلة الصاروخ ووقوده .

ل = كتلة الوقود المنطلق على شكل غاز .

ع = سرعة الصاروخ بالنسبة للأرض فى لحظة من طيرانه قبل ابتداء إصدار الكتلة ل من الغاز .

غ = سرعة الغاز المنطلق بالنسبة للصاروخ .

ن = الفترة الزمنية التى ينطلق فيها الوقود ل .

ح = عجلة الصاروخ أثناء هذه الفترة (بفرض ثبات العجلة) .

م = ل / ن = معدل انطلاق الغاز .

عند ن = صفرا تكون كمية حركة الصاروخ ومحتوياته μ = ك ع، إذا استمر انطلاق الوقود زمناً ن فإن الصاروخ يرتد بعجلة . وإذا كانت الفترة الزمنية ن صغيرة ، فإن السرعة تزيد إلى ع + ح ن . ولإضافة كميات الحركة بعد الزمن ن ، يجب أن نأخذ فى اعتبارنا أن الصاروخ الآن أخف بما يعادل الكتلة ل ، وأن سرعته قد زادت بمقدار ح ن ، وأن الغاز الآن له كمية حركة بالنسبة لسرعته غ (تفرض ثابتة) بالنسبة للصاروخ (أو) [(ع + ح ن) — عَ] بالنسبة للأرض . إذن

وللتطبيق على هذا القانون سوف نعتبر المثال الآتى ، الذى ينطبق على أحد البنادق المعروفة :

كتلة الرصاصة = ل = ١٨٠ حبة = ٠,٠٢٥٧ باوند

سرعة الرصاصة عند الفوهة = $ع_{١}$ = ٢٦٩٠ قدم / ث

كتلة البندقية = ك = ٩,٥ باوند

$ع_{٢} = \frac{٢٦٩٠ \times ٠,٠٢٥٧}{٩,٥}$ = ٧,٣ قدم / ث = ٢,٢ م / ث .

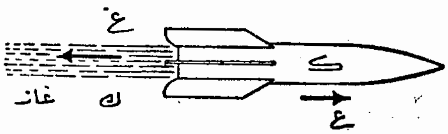
هذه هى سرعة ارتداد البندقية إذا لم تتخذ الاحتياطات لإخمادها . وإذا أدت كتف ماسك البندقية هذا الغرض ، فإن سرعة الارتداد تقل بالنسبة لكتلته والاحتكاك بين قدمه والأرض . إن « ردة » البندقية الخلفية الفجائية ما هى إلا العجلة الخاطفة الناشئة من سرعة ارتدادها عندما تترك الرصاصة فوهتها . وفى بعض البنادق يعمل على التقليل من سرعة الارتداد بجعل قاعدة البندقية ترتكز على زنبرك ، مما يطيل من زمن العجلة ويقلل من قوة الدفع المقابلة لكمية حركة ارتداد معينة .

إن موضوع السفر بالصواريخ موضوع شائق ، لأنه يتيح استخدام قاعدة بقاء كمية الحركة فى مجال جديد . فى بند (٧ — ٢) أثبتنا هذا القانون بفرض أن نظام الجسيمات الموجود يعانى تغيرات فى السرعة فقط . ولما كانت كمية الحركة عبارة عن حاصل ضرب الكتلة والسرعة ، فإن اشتقاقنا لهذا القانون الهام كان ممكنا إذا فرضنا أن الجسيمات كانت تعانى تغيرات فى الكتلة والسرعة معاً (ولو أن الاشتقاق فى هذه الحالة أكثر صعوبة) .

وكتطبيق على القاعدة العامة نعتبر موضوع المحرك الصاروخى أو النفاث . فإن قدرة هذا المحرك على الدفع تعتمد على كمية حركة الارتداد الناشئة من انطلاق نافورة غازية فائقة السرعة من فتحة فى ذيل الصاروخ . من أجل هذا الغرض يهيأ الغاز بحيث يعانى ضغطاً كبيراً ناشئاً من اشتعال وقود أو مفرقع ، ويسمح له بالتمدد بالانسياب من فتحة آخذة فى الضيق لكى يصل إلى سرعة كبيرة عند تركه لنهايتها . ويحمل الصاروخ بالأكسجين اللازم للاشتعال . وحيث إن الارتداد لا يعتمد بأية

حال على وجود الهواء الجوى ، فإن الصواريخ تطير بكفاءة تامة فى طبقات الجو العليا حيث مقاومة الهواء أقل ما يمكن . ويبشر الصاروخ بإمكان وجود وسيلة للسفر بين الكواكب . وتستخدم الطائرات النفاثة أكسجين الهواء الجوى للاشتعال ، ولكنها تعمل بالقاعدة نفسها .

ويمكن الحصول بسهولة على المعادلات الأولية المستخدمة فى الطيران بالصواريخ. لذلك نستخدم الرموز الآتية (انظر شكل ٧ — ٦) .



(شكل ٧ — ٦)

ك = كتلة الصاروخ ووقوده .

ل = كتلة الوقود المنطلق على شكل غاز .

ع = سرعة الصاروخ بالنسبة للأرض فى لحظة من طيرانه قبل ابتداء إصدار الكتلة ل من الغاز .

غ = سرعة الغاز المنطلق بالنسبة للصاروخ .

ن = الفترة الزمنية التى ينطلق فيها الوقود ل .

ح = عجلة الصاروخ أثناء هذه الفترة (بفرض ثبات العجلة) .

م = $\frac{ل}{ن}$ = معدل انطلاق الغاز .

عند ن = صفرا تكون كمية حركة الصاروخ ومحتوياته μ = ك ع ، إذا استمر انطلاق الوقود زمناً ن فإن الصاروخ يرتد بعجلة . وإذا كانت الفترة الزمنية ن صغيرة ، فإن السرعة تزيد إلى ع + ح ن . ولإضافة كميات الحركة بعد الزمن ن ، يجب أن نأخذ فى اعتبارنا أن الصاروخ الآن أخف بما يعادل الكتلة ل ، وأن سرعته قد زادت بمقدار ح ن ، وأن الغاز الآن له كمية حركة بالنسبة لسرعته غ (تفرض ثابتة) بالنسبة للصاروخ (أو) [(ع + ح ن) — غ] بالنسبة للأرض . إذن

عند نهاية الفترة الزمنية ن يمكننا أن نكتب :

$$\mu' = (\text{ك} - \text{ل})\,(\text{ع} + \text{حـ ن}) + \text{ل}\,(\text{ع} + \text{حـ ن} - \text{غ})$$

وبقانون بقاء كمية الحركة

$$\mu = \mu'$$

أى
$$\text{ك ع} = (\text{ك} - \text{ل})\,(\text{ع} + \text{حـ ن}) + \text{ل}\,(\text{ع} + \text{حـ ن} - \text{ع}')$$

مما يعطى .

$$\text{ك حـ ن} = \text{ل ع}'$$

(أو)
$$\text{ك حـ} = \frac{\text{ل}}{\text{ن}}\,\text{ع}' = \text{م ع}' \qquad \ldots\ldots \quad (٧ - ١٢)$$

ومن هذا نرى أنه لكى تكون عجلة الصاروخ كبيرة ، يجب أن تكون سرعة الغاز ومعدل انطلاقه أكبر ما يمكن . على أن الوصول إلى سرعة نهائية كبيرة لكمية معينة ونوع معين من الوقود لا يعتمد على معدل الاحتراق ، لأن سرعة الصاروخ النهائية لا تتوقف إلا على كمية حركة الارتداد الكلية . وسوف لا نحاول اشتقاق معادلة السرعة النهائية للصاروخ لأن حـ الموجودة بالمعادلة (٧ — ١٢) ليست منتظمة بسبب تغير الكتلة ك للصاروخ كلما انطلق وقود منه . ومعالجة العجلات غير المنتظمة فوق المستوى الرياضى لهذا الكتاب ، ولكن نتيجة هذا الاشتقاق مثيرة بصفة خاصة ، لأنها ترينا أن الصاروخ يستطيع الانطلاق بسرعة بالنسبة للأرض أكثر من سرعة الغاز ع' ، وبعبارة أخرى يبدو للمشاهد على الأرض أن الغاز يتبع الصاروخ بدلا من أن يرتد عنه .

تمارين

١ — جسم كتلته ١٠٠٠ جم ، يتحرك وطاقة حركته ١ چول . ما كمية حركته ؟
الجواب : ٢ × ١٠^{٥} جم . سم / ث

٢ — جسم كتلته ٢٠ جم يسير بسرعة ٩٠ سم / ث يعمل تصادما مرونيًّا مباشراً مع جسم كتلته ٤٠ جم فى حالة سكون . بعد التصادم نجد أن الجسم الذى

الذى كتلته ٤٠ جم قد أضحت سرعته ٦٠ سم / ث إلى اليمين . ماذا تصبح سرعة الجسم الذى كتلته ٢٠ جم ؟

الجواب : ٣٠ سم / ث إلى اليسار

٣ ــ كرتا بليياردو متساويتا الكتلة (إحداهما فى حالة حركة بينما الأخرى ساكنة) تعانيان تصادما مباشرا . بعد التصادم نجد أن الكرة الساكنة أصلا قد أصبحت سرعتها ٥٠ سم / ث . أوجد سرعة الكرة الأخرى الابتدائية والنهائية .

٤ ــ ذرة سرعتها مجهولة وكتلتها ١,٦٦ × ١٠$^{-٢٤}$ جم تتصادم تصادماً مباشراً (أمامياً) مع ذرة أخرى فى حالة السكون كتلتها ٦,٦٤ × ١٠$^{-٢٤}$ جم . وقد وجد أن سرعة الذرة الثانية أصبحت ١٠٠ كم / ث . أوجد السرعة الابتدائية للذرة الأولى بفرض أن التصادم مرونى .

الجواب : ٢٥٠ كم / ث

٥ ــ رصاصة كتلتها ١٠ جم تنطلق من بندقية كتلتها ١٠ كجم فتستقر فى كتلة . بفرض أن الكتلة اكتسبت نتيجة التصادم سرعة ٢٥٠ سم / ث ، فما سرعة الرصاصة ؟

الجواب : ٢٥٠٠ م / ث

٦ ــ احسب طاقة الحركة فى المسألة رقم ٥ . ما سبب النقص فى ط . ح ؟

مراجع مقترحة للاطلاع

Mach, E., "The Science of Mechanics", La Salle 111, Open Court Publishing Co., 1942.

ورد بالصفحات ٣٩٦ – ٤٢١ عرض منطقى وتاريخى عن فكرة كمية الحركة فى مسائل الاصطدام كتبه هيجنز وآخرون .

Mott-Smith, M., "This Mechanical World", New York, D. Appleton & Co., 1931.

يعالج الباب العاشر بقاء كمية الحركة .

الفصل الثامن

مبدأ الذرية وقوانين الغازات

٨ – ١ فكرة الذرية :

تعتبر الديناميكا أولى مساهمات الفيزياء فى القرنين السابع عشر والثامن عشر . فهى لم تهيئ لنا الوسائل لتحليل حركات الأجسام الأرضية فقط ، ولكن باتحادها مع قانون الجاذبية لنيوتن قد تمكنت من الوصول إلى تفهم النظام الشمسى ، بل إلى تفهم العالم أجمع فكونت بذلك ناموساً دقيقاً من القوة والحركة تخضع له جميع الأجسام المادية .

ولو أن الديناميكا نشأت أساساً فى عالم الأجسام الملموسة التى تخضع كتلاتها وسرعاتها وعجلاتها للقياس المباشر ، إلا أن نفوذها سرعان ما امتد إلى عالم المادة غير الملموسة ، وهى الذرات والجزيئات المكونة للمادة . وهذا معناه أنه قد أصبح من الممكن استخدام الآراء الميكانيكية لوصف أدق التراكيب والحركات الداخلية فى المادة ، كما استخدمت من قبل لوصف حركات الكتل المجمعة منها . ويعتبر الوصف الميكانيكى لحركات الجزيئات احدى المزايا الأساسية للعلم الفيزيائى فى القرن التاسع عشر .

ولفهم طبيعة الميكانيكا المتعلقة بما أسميناه المادة غير الملموسة والأدوار التى مرت بها نجد من الضرورى التمعن فى سؤالين أساسيين . أولا ما هو الدليل الفعلى على التركيب الذرى للمادة ؟ ثانيا ما هى الكميات القابلة للقياس ، التى يمكن وصفها بفرع الميكانيكا الخاص بهذه الذرات ؟

إن السؤال الأول يأخذنا مباشرة إلى كيمياء القرن التاسع عشر ، أما الثانى فيدعونا إلى التأمل فى بناء النظرية الميكانيكية للحرارة ، وبصفة خاصة حرارة الغازات حيث أمدتنا النظرية الأساسية بجواب يكاد يكون كاملا .

وتنسب فكرة الذرية أساساً إلى ديموقريطس الفيلسوف الإغريقى فى القرن الخامس قبل الميلاد . ولم يكن ديموقريطس أول من نادى بالذرية ، ولكنه قاد

هذه الحركة ووحد أصولها ووسع حدودها . ومن وجهة النظر الحديثة تعتبر آراؤه من أحكام الحدس التى كانت شائعة فى الفلسفة الإغريقية ، وتتلخص فى أن العالم يتكون من أجزاء صغيرة غير قابلة للفناء تسمى الذرات . وأن هذه الذرات مستقرة فى الفضاء أو الفراغ ، وهى المكونات الأساسية للمادة . ولا دليل له فى هذا الحكم سوى بساطة الفكرة والانسياق المنطقى . ومن الصعب اعتبار هذا أساساً للتدليل العلمى فى الوقت الحاضر . والقيمة العلمية الوحيدة لفكرة الذرية الإغريقية هو تأثيرها فى قيادة الفكر فى عصر النهضة بأوربا ، فقد أمدت ذلك العصر بتاريخ موروث وعرف يمكن اتباعه لبناء الذرية الحديثة .

بدأت الذرية الحديثة بتقدم الكيمياء فى أواخر القرن الثامن عشر وأوائل القرن التاسع عشر . فى هذه الأثناء درست التفاعلات الكيموية بطريقة منتظمة واكتشفت العناصر التى هى وحدات كيموية غير قابلة للتحليل بالوسائل الكيموية ، وهذه العناصر تكون المركبات التى لها خواص كيموية وفيزيائية معينة . والجسيمات الأساسية للمركبات هى الجزيئات ، بينما الذرات ما هى إلا المكونات الأساسية للجزىء (أى التى لايمكن اختزالها) . على هذا الأساس تكون المركبات (وهى الصفة الغالبة للمادة) جزيئية بينما العناصر ذرية . ويصاحب نمو فكرة العناصر فى هذه الفترة ظهور أسماء لامعة مثل « لافوازييه » و « بريستلى » و « دافى » وغيرهم . وأغلب الظن أن عدد العناصر المعروفة حتى عام ١٨٠٠ لم يتجاوز ٢٠ عنصراً بالإضافة إلى مركبات عدة لكل منها ، وبتطور الدراسة من التعبير الوصفى إلى القياس الكمى للمواد الداخلة فى التفاعلات ، ظهرت أنظمة ذات قيمة أفادت فى تدعيم وجهة النظر الذرية .

٨ — ٢ قانونا « دالتن » و « أفوجادرو » :

فى أوائل القرن التاسع عشر ظهرت إضافتان هامتان فى العلم على يد « دالتن » و « أفوجادرو » أفادتا فى نمو النظرية الذرية للمادة . ففى عام ١٨٠٨ أعلن « دالتن » عن قانونه المشهور فى النسب ، الذى ينص على أن العناصر تتحد بنسب ثابتة فى

الوزن لتكوين المركبات * . وفى العام نفسه نشر « جاى لوساك » ما يفيد أن الاتحاد الكيموى بين الغازات يتم عن طريق تناسب الحجوم بأعداد صحيحة . وبإضافة هذا القانون إلى قانون « دالتن » للنسب المركبة ، اتضح « لأفاجادرو » أن الحجوم المتساوية من الغازات تحتوى على ذرات النسبة بين أعدادها الفعلية نسبة بسيطة. وفى عام ١٨١٣ ظهرت أبسط صيغة لقانون أفوجادرو الشهير وهى الصيغة الشائعة الآن: الحجوم المتساوية من الغازات (تحت الضغط نفسه ، وفى درجة الحرارة نفسها) تحتوى العدد نفسه من الجزيئات .

وفى الخمسين عاماً التالية تحسنت القيم التجريبية التى بنى عليها كل من « دالتن » و « أفوجادرو » ملخص آرائهما ، حتى إن « كانيزارو » فى عام ١٨٥٨ أمكنه أن يبين صحتها بدقة كبيرة . ولنبين الآن أهمية قانونيهما باستخدام معلوماتنا الحالية واصطلاحاتنا فى الوقت الحاضر .

قانون « دالتن » : تتحد الذرات دائماً بنسب ثابتة فى الكتلة لتكوين الجزيئات . مثلا ١٦ جم من الأكسجين تتحد مع ٢ جم من الأيدروجين لتكوين الماء (يد٢ ا) ، يتحد ١٢ جم من الكربون مع ١٦ جم من الأكسجين لتكوين أول أكسيد الكربون (ك ا) ، ويتحد ١٤ جم من الأزوت مع ١٦ جم من الأكسجين لتكوين أكسيد الأزوتيك (ز ا) . ولنأخذ حالة أكثر تعقيدا بعض الشىء تشمل العناصر الثلاثة المتحدة فردياً مع الأكسجين . يتحد ١ جم من الأيدروجين مع ١٢ جم من الكربون ، ١٤ جم من الأزوت لتكوين سيانور الأيدروجين (يد ك ز) . والآن إذا كان جزىء أول أكسيد الكربون على سبيل المثال يتكون من ذرة من الكربون وأخرى من الأكسجين ، فإن ١٢ جم من الكربون يجب أن تحتوى على العدد نفسه

* فى النظرية الذرية تستخدم كلمة وزن وكتلة إحداهما محل الأخرى فيقال أوزان ذرية (أو) كتل ذرية . وهذا يخالف تمام المخالفة ما سبق أن فصلناه فى الباب الخامس من التمييز بينهما ، حيث قد عرفنا الوزن بأنه « قوة » هى قوة الجاذبية على الجسم . وترجع هذه العادة غالباً إلى استخدام الميزان فى مقارنة الكتل ، وهو أداة لمقارنة الأوزان فعلا . ولتجنب الالتباس سوف لا نستخدم كلمة وزن فيما يتعلق بكتل الذرات ، حتى فى المواضع التى جرى العرف على استخدام كلمة وزن فيها .

من الذرات الذى يحتويه ١٦ جم من الأكسجين . لذا فإن كتلة ذرة الكربون يجب أن تساوى $\frac{١٢}{١٦}$ من كتلة ذرة الأكسجين . وبالمثل فإن كتلة عدد معين من ذرات الأزوت يجب أن تساوى كتلة $\frac{١٤}{١٦}$ من العدد نفسه من ذرات الأكسجين ، وبالتالى فإن كتلة ذرة الأزوت $\frac{١٤}{١٦}$ من كتلة ذرة الأكسجين .

قانون أفوجادرو : الحجوم المتساوية من الغازات (تحت الضغط نفسه وفى درجة الحرارة نفسها) تحتوى على العدد نفسه من الجزيئات . بنيت هذه الصيغة على أساس مشاهدات « جاى لوساك » بأن الغازات تتحد بنسب عددية بسيطة فى الحجم لتكوين المركبات . فمثلا يتحد حجم من غاز الأزوت مع حجم مماثل تماماً من غاز الأكسجين لتكوين أكسيد الأزوت (ز ا) . بالإضافة إلى هذا ، فإن غاز أكسيد الأزوت الناتج يشغل حجما ضعف الحجم الذى يشغله الأزوت أو الأكسجين (بفرض أن الضغط ودرجة الحرارة ثابتان) . يرجع هذا إلى أن كلا من الأزوت والأكسجين فى الحالة الحرة عبارة عن جزيئات ثنائية الذرة . إذن

$$ز_٢ \quad + \quad ا_٢ \quad \longrightarrow \quad ٢ \text{ ز ا}$$

(١ حجم) (١ حجم) (٢ حجم)

فى حالة الماء شوهد أن حجمين من الأيدروجين (الذى هو أيضا ثنائى الذرة) يتحدان مع حجم واحد من الأكسجين لتكوين حجمين من بخار الماء . ويجب أن يحدد هذا المحتوى الذرى لجزىء الماء هكذا :

$$٢ \text{ يد}_٢ \quad + \quad ا_٢ \quad \longrightarrow \quad ٢ \text{ يد}_٢ \text{ا}$$

(٢ حجم) (١ حجم) (٢ حجم)

وتعتمد هذه المعادلة الكيميائية مباشرة على قانون « أفوجادرو » ، لأن حجمين من الأيدروجين ، وحجمين من بخار الماء يجب أن يحتويا على ضعف عدد الجزيئات فى حجم واحد من الأكسجين . وبمعنى آخر أن الحجوم المتساوية من الغازات تحتوى على العدد نفسه من الجزيئات ، سواء دخلت هذه فى اتحاد كيميائى أم لا .

(لاحظ أن اختلاف الكثافة يحتّم أن الحجوم المتساوية من الغازات المختلفة لا تمتلك الكتلة نفسها) . وكان عند « أفوجادرو » بعد النظر الكافى لكى يرى أنه تحت ضغط ودرجة حرارة ثابتين ، يعتمد حجم الغاز على عدد جزيئاته وحده .

٨ — ٣   مفهوم الكتل الذرية والجزيئية :

إن تكرار ظهور نسب معينة فى الكتلة باستمرار فى الاتحادات الكيميائية ، حيث تتصف هذه النسب بأنها النسب بين الأعداد الصحيحة الصغيرة تقريبا ، يشير إلى أن لهذه الأعداد أهمية ذرية أساسية ، وأن الأعداد الصحيحة المذكورة تتناسب مع الكتل الحقيقية للذرات . هذا هو الأساس الذى يبنى عليه نظام كامل لأرقام الكتل الذرية .

وهناك وحدة اختيارية محضة للكتلة تسمى وحدة الكتل (و . ك) تتخذ بحيث تحتوى عليها كتلة الذرة المفردة من الأكسجين ١٦ مرة . أى أن ا = ١٦ و . ك . ويسمى العدد ١٦ بالكتلة الذرية للأكسجين . فحسب نسب الكتل المتحدة لتكوين المركبات الكيميائية يعطى الكربون الكتلة الذرية ١٢ ، والأزوت ١٤ ، والجزىء ك ا كتلة جزيئية ١٢ + ١٦ = ٢٨ ، ز ا الكتلة ٣٠ ، ا$_2$ الكتلة ٣٢ . فى هذا المشروع يجب أن يعطى لذرات الأيدروجين الكتلة ١ لأنه فى المركب (يدك ز) يتحد ١ جم من عنصر الأيدروجين مع ١٢ جم من عنصر الكربون ، ١٤ جم من عنصر الأزوت . وبما أن ٢ جم من غاز الأيدروجين (يد ٢) يتحد مع ١٦ جم من غاز الأكسجين لتكوين الماء ، فلابد أن توجد ذرتان من الأيدروجين وذرة من الأكسجين فى جزىء الماء (يد$_2$ ا) . وهذا تحقيق للنتيجة التى توصلنا إليها بفرض « أفوجادرو » .

ويجب تذكر أن الكتلة الذرية ما هى إلا عدد يمثل كتلة الذرة بوحدة اختيارية محضة . أما الكتلة الحقيقية للذرة المفردة فهى عدد الكتلة × كتلة و . ك بالجرام . وهناك كتلة أخرى ذات أهمية خاصة فى النظرية الذرية تسمى « جرام — ذرة » جرى العرف على تسميتها بالجرام الذرى محليًّا . وهى كتلة بالجرام من العنصر مساوية لعدد كتلته الذرية . وللجزيئات وحدة مشابهة تعرف باسم الجرام الجزيئى وهى كتلة

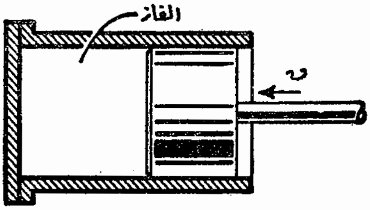
بالجرام من المركب أو العنصر مساوية لقيمة كتلته الجزيئية . فمثلا ٣٢ جم من غاز الأكسجين هو الجرام الجزيئى للأكسجين .

وقد يظهر لغير المختص بأن هذا نوع من الترقيم أو الفهرسة لا أكثر ولا أقل ، ولكن الواقع أن لهذه الأعداد أهمية كبرى فى علمى الكيمياء والفيزياء الذرية . إذ بوساطته يمكن صياغة قانون «دالتن» هكذا : تتحد الذرات دائماً بنسب كتلها الذرية لتكوين جزىء ، وبوساطة الكتل المتحدة يمكن تحديد كتل ذرية لجميع العناصر . ونتيجة لهذا الإجراء المتبع نجد أن بعض الكتل الذرية أعداد صحيحة تقريبا ، وبعضها يشذ عن العدد الصحيح (الكلور ٣٥,٥) . وبتحسين وسائل القياس وجد أن جميع الكتل الذرية تخرج عن الأعداد الصحيحة . ولو أن هذا الخروج بسيط غالباً ، إلا أنه قابل للقياس . فالأيدروجين ١,٠٠٨١ ، والكربون ١٢,٠٠٤ وهكذا . وسوف نعطى لهذه الأعداد مع كسورها المذكورة أهمية قصوى فى دراسة الكيمياء النووية فى الجزء الأخير من هذا الكتاب .

٨ — ٤ الضغط وقياسه :

خلال النصف الأول من القرن التاسع عشر لقيت فكرة الذرية فى الكيمياء نجاحاً وإقبالا ، وتعود العلماء على التفكير فى المادة بتعبيرات ذرية . وفى هذه الفترة أيضا ازدادت آراء « جاى لوساك » و « أفوجادرو » عن الغازات وأصبحت أساساً لنظرية ميكانيكية عن الحرارة . وفى النصف الأخير من القرن المذكور أخذت هذه النظرية الصيغة الحالية المسماة بالنظرية الكينيتيكية (أو نظرية الحركة) فى الغازات . ولتفسير هذا التطور سوف نحتاج إلى إعادة النظر فى الحقائق الأساسية المتعلقة بالخواص القابلة للقياس فى الغازات المحصورة ، مما يقودنا باختصار إلى قياس الضغط ودرجة الحرارة .

إن الغازات المحصورة تؤثر بقوى على حوائط الآنية الحاوية لها . وهذا طبيعى ، لأننا نحتاج إلى قوة لضغط هذه الغازات . وإذا قفلت الأسطوانة الحاوية لغاز بمكبس (شكل ٨ — ١) وأثرنا بقوة ق على هذا المكبس ، فإن الغاز ينضغط



(شكل ٨ — ١)

وبانضغاطه يولد قوة تضاد ق حتى يصل المكبس أخيراً إلى وضع التوازن تحت تأثير هاتين القوتين المتساويتين حالياً . وحيث إن الغاز يضغط على جميع أجزاء سطح المكبس ، فمن الطبيعي أن نتصور أن الغاز يؤثر بقوة على وحدة المساحات من سطح المكبس . يطلق على هذه القوة الأخيرة اسم ضغط الغاز :

$$\text{الضغط} = \frac{\text{القوة}}{\text{المساحة}}$$

وإذا رمزنا للضغط بالرمز ض . وللمساحة بالرمز ا

$$\text{ض} = \frac{\text{ق}}{\text{ا}} \text{ داين / سم}^{٢}$$

ويجب أن تكون القوة ق عمودية على المساحة ا .

وهناك طريقة بسيطة لقياس الضغط تعتمد على حقيقة معروفة ، هى أن السوائل تضغط بقوة ناشئة من وزنها . فشكل (٨ — ٢) يمثل أسطوانة من السائل — فوقها فراغ — ومساحة مقطعها المستعرض ا ، ونريد الآن حساب ضغطها على قاع الإناء الحاوى للسائل . إن القوة التى يضغط بها السائل على قاع الإناء ، لا تخرج عن كونها قوة الجاذبية ك . حـ على قاع الإناء ، حيث ك الكتلة الكلية للسائل. إذن فالضغط هو :

$$\text{ض} = \frac{\text{ك . حـ}}{\text{ا}}$$

وبدلا من أن نتكلم عن كتلة الغاز ، من المناسب أحياناً أن نتكلم عن نسبة كتلته إلى حجمه . هذه النسبة هى كثافته ، ونرمز إليها بالرمز ρ (رو) . وإذا رمزنا للحجم بالرمز ح فإننا نعرف الكثافة هكذا :

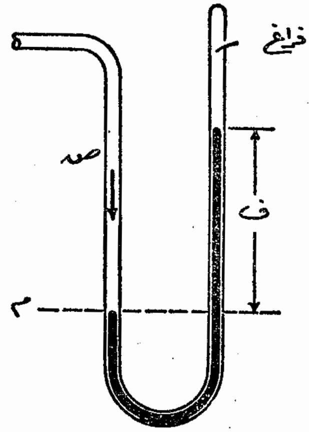
$$\rho = \frac{\text{ك}}{\text{ح}} \text{ جم / سم}^{٣}$$

(وهذا التعريف ينطبق على جميع أحوال المادة سواء كانت غازية أو سائلة أو أجساما صلبة) . وبدلالة الكثافة تكون كتلة السائل الممثل بشكل (٨ — ٢) هى ك = م ح . وحيث إن العمود أسطوانى فإن ح = ا ف ، حيث ف الارتفاع .
إذن :

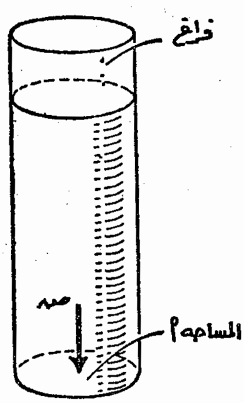
$$\text{ض} = \frac{\text{ك . حـ}}{\text{ا}} = \frac{\text{م . ح . حـ}}{\text{ا}} = \frac{\text{م . ا . ف . حـ}}{\text{ا}}$$

أو $\text{ض} = \text{م . حـ . ف}$ . . . . . . (٨ — ١)

لذا فإن الضغط الناشئ عن عمود السائل يتناسب مع الارتفاع ف للعمود ، ومع كثافة السائل ، وهو لا يعتمد على مساحة قاعدة العمود ، ولو أن تعريف



(شكل ٨ — ٣)



(شكل ٨ — ٢)

الضغط نفسه يعتمد على هذه المساحة . وحيث إن التشابه ضعيف بين المعادلة (٨ — ١) وتعريف الضغط ، فقد يكون من المفيد التريث قليلا لمراجعة وحداتنا ،

$$\text{ض} = \text{م . حـ . ف}$$

$$\text{وحدة الضغط} = \frac{\text{جم}}{\text{سم}^3} \times \frac{\text{سم}}{\text{ث}^2} \times \text{سم}$$

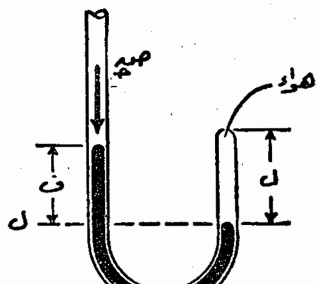
$$= \frac{\text{جم . سم}}{\text{ث}^2} \times \frac{1}{\text{سم}^2} = \frac{\text{داين}}{\text{سم}^2}$$

تشير المعادلة (٨ — ١) إلى طريقة مناسبة لقياس الضغط بدلالة طول عمود السائل المحمول . مثل هذه الوسيلة إذا اتخذت لقياس الضغط تسمى المانومتر . والسائل فى العادة يكون زئبقاً والأنبوبة منحنية على شكل حرف U . وتكون إحدى نهايتى الأنبوبة مقفلة ومفرغة من الهواء ، أما النهاية الأخرى فتتصل بالحيز المراد قياس ضغط الغاز فيه (شكل ٨ — ٣) .

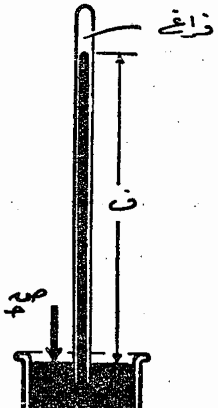
فى هذه الحالة يتحرك السائل حتى يصير فى حالة توازن تحت تأثير ضغط الغاز وقوة الجاذبية . وعند المستوى م يكون ضغط الغاز إلى أسفل هو ض على الجزء الأيسر من سائل الأنبوبة ، بينما يكون الضغط على الجزء الأيمن هو ρ . ف . حـ . ويكون السائل تحت م فى حالة توازن تحت تأثير هذين الضغطين ، أى أن :

$$ض = \rho . حـ . ف$$

وهى مماثلة للمعادلة (٨ — ١). وإذا كان ضغط الغاز الخارجى صفرا ، فإن السائل يأخذ المستوى نفسه فى فرعى الأنبوبة أى ف = ٠ وبزيادة الضغط ض تزداد ف . وعندما يستخدم مثل هذا المانومتر لقياس الضغط الجوى ، فإننا نسميه بارومترا ، وهذا موضح بشكل (٨ — ٤) حيث يستعاض عن الأنبوبة حرف U



(شكل ٨ — ٥)



(شكل ٨ — ٤)

بحوض مفتوح للجو . وفى المتوسط اليومى عند سطح البحر ، فإن ضغط الهواء الجوى

على سطح زئبق الحوض يدفع الزئبق فى أنبوبة البارومتر إلى ارتفاع ٧٦,٠ سم .
وحيث إن كثافة الزئبق ١٣,٦ جم / سم^3 ، فإن الضغط الجوى ضجـ هو :

ضجـ = م . حـ . ف = ١٣,٦ × ٩٨٠ × ٧٦,٠

= ١,٠١ × ١٠^6 داين / سم^2

يسمى الارتفاع ٧٦ سم من الزئبق (أو قيمته بوحدات س . ج . ث . وهى ١,٠١ × ١٠^6 داين / سم^2) بالضغط الجوى « العيارى » .

٨ — ٥ قانون بويل :

اكتشف بويل فى عام ١٦٦٢ القانون المعروف باسمه واستخدم لذلك أنبوبة مانومترية تختلف عن الموجود بشكل (٨ — ٣) فى أن الأنبوبة المقفلة التى فوق الزئبق تحتوى على هواء . وهذا الجهاز مبين بشكل (٨ — ٥) . وبإضافة زئبق إلى الأنبوبة المفتوحة أمكنه أن يغير الارتفاع ف وبالتالى ضغط الكمية المحصورة من الهواء . وهذا الضغط هو :

ض = ضجـ + م . حـ . ف

لأن هذا هو الضغط عند المستوى م اللازم لموازنة عمود الزئبق ف ، مضافا إليه الضغط الجوى ضجـ والمؤثر أيضا إلى أسفل . وكلما أضيف زئبق انضغط الغاز ، ويقاس مقدار الانضغاط الحادث بملاحظة الطول « ل » . حجم الغاز المحصور هو :

ح = أ . ل

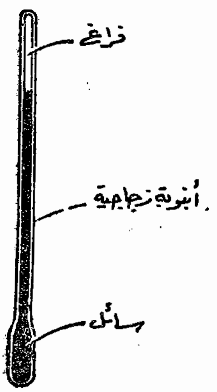
وقد وجد بويل أن هذا الحجم يتناسب عكسيا مع ضغط الغاز أى أن ض يتناسب مع $\frac{١}{ح}$ أو :

ض ح = ثابت . . . . (٨ — ٢)

وقد وجد بويل أن هذا القانون يكون مضبوطاً تماما ، عندما تكون درجة حرارة الحيز ثابتة ، أو عندما يحدث الانضغاط بطيئا مع الزمن بإعطاء الغاز الوقت الكافى لاستعادة درجة حرارته الأصلية بعد كل انضغاط .

٨ ــ ٦ درجة الحرارة وقياسها :

درجة الحرارة هى مقياس شدة الحرارة أو الدفء الموجود بالجسم (أو درجة سخونته) . وتبين الخبرة العادية أن الحرارة ودرجة الحرارة شيئان مختلفان ، والمقصود بالحرارة كميتها ، أما درجة الحرارة فهى شيء آخر. وعلى سبيل التمثيل نقول : إننا نحتاج إلى كمية من الحرارة لرفع درجة حرارة جالون من الماء ١٠ درجات أكثر بكثير من الكمية التى نحتاج إليها لرفع درجة حرارة كوب بالمقدار نفسه . وسوف نرى أن الحرارة هى طاقة الحركة للجزيئات ، وأن درجة الحرارة تتناسب مع مقدار ما يخص الجزىء الواحد فى المتوسط من الطاقة ،ويسمى الأخير بالتعريف المطلق للدرجة .



(شكل ٨ ــ ٦)

ويتركب الترمومتر فى العادة من أنبوبة زجاجية مفرغة تحوى زئبقاً أو كحولا ملونا (شكل ٨ ــ ٦) وعند وضعه فى وسط بارد يهبط مستوى السائل، وعندما يسخن الوسط يرتفع السائل . وهذا ينشأ من ازدياد تقلص أو تمدد السائل بالنسبة لتقلص أو تمدد المحتوى الزجاجى . وفى الأغراض المعتادة يهمل تمدد الزجاج لصغره . ويدرج الترمومتر بالدرجات بالكيفية الآتية . يغمز الترمومتر فى حمام بارد (فى العادة جليد منصهر) ، ثم فى حمام ساخن (فى العادة ماء يغلى بظروف معينة) ، ثم يؤشر بعلامة عند مستوى السائل فى الحالتين ، ويعطى قيما عددية بطريقة اختيارية كما يأتى :

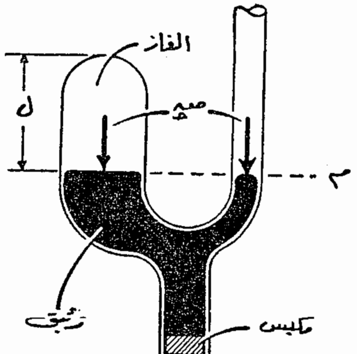
« يسمى مستوى السائل فى حالة انصهار الجليد ٠°م على المقياس المئوى (أو ٣٢° على المقياس الفهرنهيتى ، كما يسمى مستوى السائل عند نقطة الغليان ١٠٠°م على المقياس المئوى ، أو ٢١٢° على المقياس الفهرنهيتى » .

ثم يقسم الساق بين هاتين العلامتين إلى فترات متساوية فى الطول كل فترة منها تقابل فترة خاصة من درجة الحرارة . وفى حالة المقياس المئوى توجد ١٠٠ فترة متساوية أو درجة بين علامتى ٠° ، ١٠٠° ، وبعملية امتداد للمقياس يمكن أن يستخدم فوق ١٠٠ وتحت الصفر .

وهذا تدريج اختيارى محض . وقد يعترض البعض بأننا قد فرضنا مقدما أن الزئبق يتمدد بانتظام بارتفاع درجة الحرارة بدون أن يكون لدينا الأساس لذلك . والجواب على ذلك هو : أن درجة الحرارة هى التى تعرف فعلا على هذا الأساس ، أى على أن الزيادات المتساوية فى حجم الزئبق تقابل فترات متساوية فى درجة الحرارة . على أن مقياس درجة الحرارة المثالى لا يستخدم الزئبق أو الكحول . وإنما يستخدم مواد أخرى أنسب من هذين فيما يسمى بالترمومتر العيارى . وهذه المواد هى الغازات الدائمة . وهذا الاختيار مبنى على أساس نظرى كما هو مبنى على الأداء المستمر الصحيح . فإن بعض الغازات مثل الأيدروجين والأزوت والهليوم والأرجون والأكسجين تعطى دائما نفس القراءة الحرارية إلى درجة عالية من الضحة عندما تكون درجات الحرارة المستخدمة فيها بعيدة عن درجة أسالتها . إن هذه الغازات تتمدد جميعا بنفس النسبة لوحدة درجة الحرارة ، وهذه القيمة واحدة على المقياس الحرارى .

٨ — ٧ الترمومتر الغازى والصفر المطلق

حيث إن التغير فى حجم الغاز ينشأ عنه فى العادة تغير فى الضغط ، فإن الترمومتر الغازى أكثر تعقيدا من الترمومتر الزئبقى الذى يتميز بسطح حر لزئبق لا ينضغط . وفى أحد أنواع الترمومتر الغازى يحفظ حجم الغاز ثابتا ، ويشاهد الارتفاع فى درجة الحرارة كزيادة فى الضغط . وفى نوع آخر يتغير الحجم بينما يحفظ الضغط ثابتا . وهذا الأخير مبين بشكل (٨ — ٧) فى الحالة التى يكون فيها الضغط الثابت هو الضغط الجوى ضـ . فالأنبوبة التى إلى اليسار تحوى الغاز ، وعند رفع درجة حرارته يتمدد الغاز إلى أسفل رافعا المستوى عند م . على أن



(شكل ٨ — ٧)

المكبس يمكن خفضه لإرجاع المستويين إلى الارتفاع نفسه ، وبذلك يحفظ ضغط

الغاز فى الارتفاع ثابتاً عند ضـ . ويدون التغير فى الحجم كتغير فى طول عمود الغاز (ل) . وفى الترمومتر الغازى ثابت الضغط تؤخذ أقطار الأنابيب الزئبقية صغيرة بينما يكون انتفاخ الغاز كبيرا ، حتى يزداد فرق المستويين الناشئ من التمدد .

ولقد شاهد شارل وغيره من الباحثين أن الزيادة النسبية فى الحجم لوحدة درجة الحرارة ثابتة ، وأن عدداً كبيرا من الغازات يتفق فى قيمة هذا الثابت وهو $\frac{١}{٢٧٣}$ لكل تغير فى درجة الحرارة قدره درجة مئوية واحدة . وقد لاحظ « شارل » أيضا أنه إذا حفظ الحجم ثابتا ، وشوهد التغير فى الضغط فإن الزيادة النسبية فى الضغط لكل درجة مئوية هى $\frac{١}{٢٧٣}$ أيضا لغازات كثيرة . ورياضيا يمكن صياغة قانونى شارل هكذا :

$$ح = ح_{٠} + ح_{٠} \times \frac{ء}{٢٧٣} \qquad (\text{ض ثابت})$$

$$ض = ض_{٠} + ض_{٠} \times \frac{ء}{٢٧٣} \qquad (\text{ح ثابت})$$

حيث يشير الدليل صفر إلى قيمة ح ، ض عندما تكون درجة الحرارة المئوية ء تساوى صفرا . ويبين شكل (٨ — ٨) طريقة رسم تغيرات الحجم مع درجة الحرارة عندما يحفظ الضغط ثابتا . ومن الواضح أنه إذا كانت ء = — ٢٧٣° م فإن $ح = ح_{٠} - ح_{٠} = ٠$ ، $ض = ض_{٠} - ض_{٠} = ٠$ ، ومن الناحية الفيزيائية لا يشاهد هذا لأن جميع الغازات تسيل قبل الوصول إلى هذه الدرجة . فتحت الضغط الجوى المعتاد يسيل الأزوت فى — ١٩٦° م ، الأيدروجين فى — ٢٥٣° م . وأخفض درجات الأسالة هى للهليوم الذى يسيل عند — ٢٦٩° م . ويدل قانون شارل على أن —٢٧٣° م هى أبرد درجة فى الوجود ، لأنه حتى بفرض أن الغاز مثالى ، ولا يسيل حتى هذه الدرجة فإن حجمه أو ضغطه يصيران صفراً عندها ، ولا يوجد ما هو أقل من الصفر فى الحجم أو الضغط . والأهم من هذا — كما سنرى فيما بعد — تكون الطاقة الجزيئية عند هذه الدرجة صفراً أيضا . لأجل هذه الأسباب تسمى ء = — ٢٧٣° م بالصفر المطلق . وهناك مقياس درجة حرارة طبيعى كثيراً ما يستخدم ، يبدأ صفره عند هذه الدرجة المشار إليها (أى الصفر المطلق) ويسمى هذا بمقياس « كلفن » الحرارى (أو) المقياس المطلق . ووحدة درجة حرارته المرموز إليها بالرمز ك

(نسبة إلى كلفن) هى نفس الوحدة المئوية . ولذا توجد علاقة بين القراءتين هكذا :

$$\text{ر} = \text{ء} + ٢٧٣^\circ \text{ك}$$

(وسوف نستخدم ء باستمرار للمقياس المئوى ، ر لمقياس كلفن)

وعلى هذا المقياس الحرارى يمكن كتابة قانونى « شارل » هكذا :

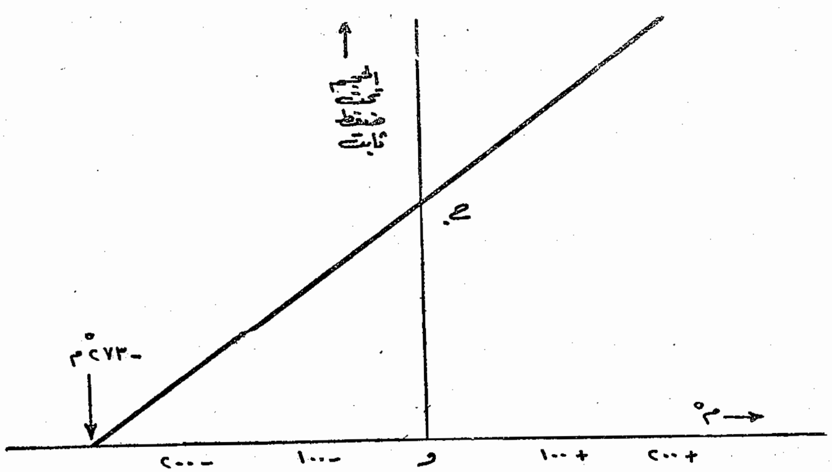
$$\text{ح} = \text{ح}_\cdot + \text{ح}_\cdot \times \frac{(\text{ر} - ٢٧٣)}{٢٧٣} = \text{ح}_\cdot \times \frac{\text{ر}}{٢٧٣}$$

$$\text{ض} = \text{ض}_\cdot + \text{ض}_\cdot \times \frac{(\text{ر} - ٢٧٣)}{٢٧٣} = \text{ض}_\cdot \times \frac{\text{ر}}{٢٧٣}$$

وإذا أسمينا $\text{ر}_\cdot$ (= ٢٧٣° ك) بدرجة الحرارة المقابلة للدرجة ء = ٠ فإن هذين القانونين يمكن كتابتهما بصيغتى التماثل الآتيتين :

$$\frac{\text{ح}}{\text{ر}} = \frac{\text{ح}_\cdot}{\text{ر}_\cdot} \quad \text{(ض ثابت)} \quad \ldots\ldots \quad (٨ - ٣)$$

$$\frac{\text{ض}}{\text{ر}} = \frac{\text{ض}_\cdot}{\text{ر}_\cdot} \quad \text{(ح ثابت)} \quad \ldots\ldots \quad (٨ - ٤)$$



(شكل ٨ — ٨)

٨ — ٨ القانون العام للغازات :

إن قانون « بويل » (المعادلة ٨ — ٢) وصيغتى قانون « شارل » (المعادلتان ٨ — ٣ ، ٨ — ٤) يمكن إضافتهما لتكوين معادلة واحدة ، تبين العلاقة بين درجة الحرارة والضغط والحجم لعينة معطاة من الغاز . وتسمى هذه المعادلة بالقانون العام للغازات ، الذى يصف العلاقة بين الكميات الثلاث : الضغط ودرجة الحرارة والحجم ، فى أعم معادلة بين المتغيرات الثلاثة البسيطة للغازات المحصورة . ويمكن اشتقاق هذه المعادلة بكتابة العلاقة بين متغيرين بينما العامل الثالث ثابت ، نكرر هذا مرتين مع اختلاف العامل الثابت فى الحالتين ، واستخدام طرق التناسب المعتادة . والأبسط من ذلك ، هو أن تكتب النتيجة وتشتق منها المعادلات الثلاث المشار إليها كحالات خاصة منها . وهذه النتيجة العامة هى :

$$\frac{\text{ح ض}}{\text{ر}} = \frac{\text{ح}_{.}\,\text{ض}_{.}}{\text{ر}_{.}} \qquad \text{(٨ — ٥)}$$

حيث ض.، ح.، ر. هى القيم عند نقطة بدء معينة (عادة ٠° م ، ٧٦ سم من الزئبق) . ومن الواضح ، أنه إذا كانت ر (درجة الحرارة المطلقة) ثابتة ، فإننا نحصل على قانون « بويل » ، الذى يعمل فقط عندما تكون درجة الحرارة ثابتة . فإذا حفظنا الحجم ثابتا فإن ح تشطب مع ح. فى المعادلة (٨ — ٥) ونحصل على المعادلة (٨ — ٤) . وهذا هو قانون شارل للحجم الثابت . وإذا حفظنا الضغط ثابتا ، فإن المعادلة (٨ — ٥) تتحول إلى المعادلة (٨ — ٣) ، التى هى صيغة قانون « شارل » للضغط الثابت . وبذلك نكون قد بينا أن المعادلة (٨ — ٥) تشمل الحالات الثلاث الخاصة الأخرى ، وأن هذه المعادلات تعمل تحت الظروف المبينة فى القوانين التجريبية .

ومن الممكن الحصول على قيمة الطرف الأيسر فى المعادلة (٨ — ٥) بالاتفاق اختياريا على ظروف مثالية : القيمة المناسبة للضغط ض هى قيمة الضغط الجوى المعتاد ، ٧٦ سم من الزئبق (أو) ١,٠١ × ١٠^٦ داين / سم^٢ . بالمثل تؤخذ قيمة ر. على أنها درجة الحرارة المطلقة المقابلة للصفر المئوى أى ٢٧٣° ك . ويسمى الضغط

$ض_٠$ ، ودرجة الحرارة $ر_٠$ المشار إليهما بالضغط المعتاد ، ودرجة الحرارة المعتادة أو اختصاراً بمعدل الضغط ودرجة الحرارة ورمزيا م . ض . ء . أما مسألة الحجم « العيارى » فهى ليست واضحة ، لأن الحجم عند $ض_٠$ ، $ر_٠$ سوف يعتمد على كتلة الغاز المأخوذ . ولكن إذا رجعنا بالذاكرة إلى قانونى « دالتن » و « أفوجادرو » نجد أنهما يشيران بقوة إلى أنه للتفاعلات الكيميائية على الأقل يعتبر الجرام الجزيئى ذا أهمية خاصة . (كذلك الجرام الذرى إذا كانت المادة أحادية الذرة) . لذلك نختار كتلتنا « العيارية » هى الجرام الجزيئى . ويبين قانون « دالتن » أن الجرام الجزيئى لأية مادة يحتوى على عدد الجزيئات نفسه ، التى يحتويها أى جرام جزيئى آخر . ويبين قانون « أفوجادرو » أن الأعداد المتساوية من الجزيئات (تحت نفس الظروف تشغل الحجم نفسه . لذا فإن حجم الجرام الجزيئى هو عدد ثابت من السهل قياسه ، فما على الإنسان إلا أن يحصل على ٣٢جم من الأكسجين (أو) ٢ جم من الأيدروجين (أو) ٢٨ جم من الأزوت ويقيس حجمها فى م . ض . ء . النتيجة شيء يسمى بالحجم الجزيئى وقيمته ٢٢٤٠٠ سم^٣ . هذه هى القيمة التى نختارها للحجم $ح_٠$. وإذا رمزنا للنسبة $\frac{ض_٠ ح_٠}{ر}$ بالرمز م ، فإن م $= \frac{ض_٠ ح_٠}{ر_٠} =$

$$\frac{١,٠١ \times ١٠^{٦} \times ٢٢،٤٠٠}{٢٧٣} = ٨,٣١ \times ١٠^{٧}$$

إرج / °ك ، ويسمى م بثابت الغاز الجزيئى أو الثابت العام للغازات . ويمكن التحقق من أن وحدته هى إرج / °ك بكتابة معادلة الوحدات :

$$م = \frac{ض_٠ ح_٠}{ر_٠}$$

$$\text{وحدة}\quad م = \frac{\text{داين}}{\text{سم}^٢} \times \text{سم}^٣ \times \frac{١}{°ك} = \text{داين . سم} / °ك$$

$$= \text{إرج} / °ك$$

فى اختيار الكميات « العيارية » فى القانون العام للغازات قيدنا الحجم ح بحجم الجرام الجزيئى ، لذا فإن الطرف الأيمن فى المعادلة (٨ ــ ٥) مقيد بهذه الكتلة

أيضا . وهذا التحديد لا ضرورة له ، لأنه إذا كانت لدينا كتلة من الغاز خلاف الجرام الجزيئى ، فإننا نضرب الثابت العام (م) بكسر الجرام الجزيئى الموجود . وإذا أسمينا هذا الكسر الجزيئى بالرمز (س)، وبكتابة درجة الحرارة ر فى الطرف الأيسر من المعادلة ، نحصل على :

(للجرام الجزيئى) ض ع = م ر . . . . (٨ – ٦)

(لكسر س من الجرام الجزيئى) ض ع = س م ر

المعادلة (٨ – ٦) هى الصيغة المعتادة المطلقة للمعادلة العامة للغازات .

مثال ١ : ما هى كثافة الأكسجين فى م . ض . ء ؟ حسب التعريف الكثافة هى كتلة / حجم، وجرام جزيئى من ا٢ (أو من أى غاز) يشغل الحجم الجزيئى عند م . ض ؛ ء . إذن :

$$ث = \frac{ك}{ع} = \frac{٣٢}{٢٢٤٠٠} = ١,٤٣ \times ١٠^{-٣} \text{ جم / سم}^{٣} \text{ (الجواب).}$$

مثال ٢ : حجم كتلة معينة من غاز هو ٢٠٠ سم^{٣} عندما كان ضغطها ٧٦ سم من الزئبق ودرجة حرارتها ١٠° م ، سمح لها بالتمدد إلى حجم جديد قدره ١٠٠٠ سم^{٣} عند ضغط جديد قدره ١٠ سم من الزئبق . ما درجة حرارتها ؟

ض. = ٧٦سم من الزئبق ، ع. = ٢٠٠ سم^{٣} ، ر. = ٢٧٣ + ١٠ = ٢٨٣°

ض = ١٠سم من الزئبق ، ع = ١٠٠٠سم^{٣} ، ر = ؟

$$\frac{ض\ ع}{ر} = \frac{ض.\ ع.}{ر.}$$

$$\frac{١٠ \times ١٠٠٠}{ر} = \frac{٧٦ \times ٢٠٠}{٢٨٣}$$

ر = ١٨٦° ك = – ٨٧° م (الجواب)

مثال ٣ : ما حجم ١٠ جم من الأكسجين فى م . ض ، ء ؟

نعلم أن الجرام الجزيئى (٣٢ جم من هذا الغاز) يشغل حجما قدره ٢٢٤٠٠ سم^{٣}

إذن حجم ١٠ جم هو :

$$\frac{١٠}{٣٢} \times ٢٢٤٠٠ = ٧٠٠٠ \text{ سم}^{٣} \text{ (الجواب)}$$

مثال ٤: قنينة مملوءة بالأزوت ($ز_٢$) حجمها ١٠٠٠ سم^٣ ، ضغط الغاز بها ٢ جو ، درجة حرارتها ٢٠° م . ما كتلة الغاز ؟

ض ح = س م ر

ض = ٢×١,٠١×١٠^٦ داين/سم^٢، ح =١٠٠٠ سم^٣ ، ر =٢٩٣° ك

ر = ٨,٣١ × ١٠^٧

إذن ٢ × ١,٠١ × ١٠^٦ × ١٠^٣ = س × ٨,٣١ × ١٠^٧ × ٢٩٣

س = ٠,٠٨٣ جرام جزيئى

ولكن الجرام الجزيئى من $ز_٢$ =٢٨جم ∴ س = ٠,٠٨٣ × ٢٨

= ٢,٣جم (الجواب)

تمارين

١ — منزلق على الجليد وزنه ٧٥ كيلوجرام . إذا كان طول كل من سنى الانزلاق ١٥ سم وعرضه ٦ مم ، ما هو الضغط الذى يعمله على الجليد (إذا كان ينزلق على رجل واحدة) ؟ الجواب : ٨,١٥ ميجاداين / سم^٢

٢ — عمود أسطوانى من الصلب (كثافته ٧,٨ جم / سم^٣) ارتفاعه ٢ م وقطر قاعدته ٢٠ سم يرتكز على بلاط أفقى . ما هو الضغط الذى يعمله ؟
الجواب: ١,٥٣ × ١٠^٦ داين / سم^٢

٣ — إذا كان الضغط الجوى « العيارى » يستطيع إقامة عمود من الزئبق (م = ١٣,٦ جم / سم^٣) فما طول عمود الماء (م = ١ جم / سم^٣) الذى يستطيع إقامته ؟ الجواب : ١٠,٣ م (٣٤ قدم)

٤ — حجم كتلة معينة من غاز هو ٥٠٠ سم^٣ فى ٧٠° م . ما حجمها فى — ٨٠° م إذا ثبت الضغط ؟ الجواب : ٣٥٤ سم^٣

٥ — كتلة معينة من غاز تشغل حجما قدره ٥٠٠ سم^٣ فى م . ض . د . إذا ارتفعت درجة حرارتها إلى ٥٠° م ، وتغير ضغطها إلى ١٠٠ سم من الزئبق ، فما حجمها تحت هذه الظروف ؟ الجواب : ٤٥٠ سم^٣

٦ — باستخدام الجدول حـ فى ملحق الكتاب ، عين الكتلة التى تكون جراما جزيئيا من الجزيئات الآتية :

ا٢ ، يد٢ ا ، يدك ز ، ص كل ، يد٢ كب ا٤ ، يو ف٦

٧ — ما هو حجم ٥ جرامات جزيئية من الهليوم فى ١٠٠° م وتحت الضغط الجوى ؟ الجواب : ١٥٣٠٠٠ ، ١٥٣ سم٣ (أو) ١٥٣ لتر

٨ — ما هو ضغط ٢,٠ جرام جزيئى من الأيدروجين الذى حجمه ١٠٠ سم٣ ودرجة حرارته — ٢٠° م ؟ الجواب : ٤,٢ × ١٠^٧ داين / سم٢

مراجع مقترحة للاطلاع

Bragg, Sir William, "Concerning the Nature of Things", London, G. Bell & Sons, 1925.

المحاضرة الأولى عرض مبسط عن فكرة الذرية كتبت بأسلوب ممتع .

Dampier, Sir William, "A History of Science", New York, The Macmillan Co., 1946.

تحوى الصفحات ٢٢٥ — ٢٣١ عرضا تاريخيا عن الذرية فى القرن التاسع عشر .

Gregory, J. G.,"A Short History of Atomism", London A & C. Black, 1931.

تعالج الأبواب من ١ إلى ٥ التاريخ الأول لفكرة الذرية . وتعالج الأبواب ٧ — ٨ النظرية الذرية لدالتن .

Hecht, Selig, "Explaining the Atom", New York, Viking Press, 1947.

يلخص الباب الأول بأسلوب مبسط جميع الدلائل على الذرية .

Mott-Smith, M. "Heat & its Working", D. Appletom & Co., New York, 1933.

الأبواب ١ — ٣ بها عرض أولى شائق عن فكرة درجة الحرارة وصفات الغاز .

Moulton, F. R. and Schiffers , J.J. "The Autobiography of Science", New York, Doubleday Doran & Co., 1945.

تشمل صفحتا ١٥ — ١٦ آراء لوقريطس عن الذرية .

الفصل التاسع

الطاقة الحرارية ونظرية الحركة للغازات

٩ ــ ١ الآراء القديمة :

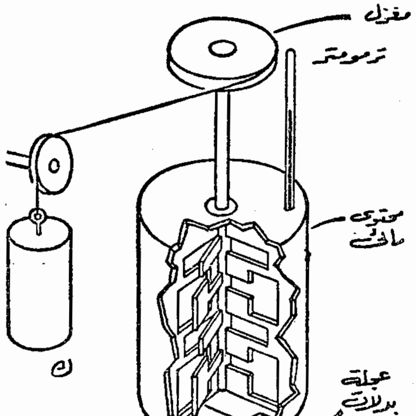
لا يمكن تحديد السنة التى ولدت فيها النظرية الميكانيكية للحرارة . فالمعروف من قديم الزمان أن الاحتكاك والضغط يولدان حرارة ، ولكن حتى نشوء النظرية الذرية للمادة ، لا يمكن القول بأنه كانت هناك نظرية منتظمة عن الحرارة والحركة الجزيئية . إن « دانيل برنولى » الذى اشتق قانون بويل من نظرية تتعلق بحركة جسيمات الغاز من قبل اكتمال نظرية الحركة فى الغازات بمائة عام ، قد أشار إلى أن نظريته تستطيع تفسير زيادة ضغط الغاز الناشىء عن تسخينه . على أن نظرية برنولى لم تقابل بترحاب كبير ، وخلال القرنين الثامن عشر والتاسع عشر ، لم تكن تعتبر الحرارة سوى مادة أطلق عليها اسم السيال الحرارى تنتقل افتراضا من جسم إلى آخر. واعتبر هذا السيال عديم الكتلة واللون ولا يمكن الإلمام به بالمشاهدة . عند اقتراب جسم من لهب كان يظن أن السيال ينتقل من اللهب إلى الجسم . أما الاحتكاك ، فالمفروض أنه كان يعصر هذا السيال ويطرده إلى السطحين المحتكين فيسخنهما .

يعتبر هذا النوع من التصور النظرى لطبيعة الحرارة شبيها أكبر الشبه بطريقة قدماء الإغريق فى التأمل الفكرى فى العلم . ولكن المحاولات التى عملت لبعثها من جديد ، كانت لسوء حظها فى عصر قد ابتدأ الفكر الاستقرائى يأخذ فيه شكلا مستقرا فى علم الفيزياء . وعند تعريض نظرية السيال لمحك التجربة القاسى فشلت وسقطت . فإن الكونت « رمفرد » ــ وهو أمريكى كان يشغل منصبا كبيرا عند عمدة بافاريا ــ تساءل إلى أى حد وإلى متى نستطيع الحصول على سيال حرارى من عملية ثقب المدافع ، فالظاهر أن الكميات الممكن الحصول عليها من السيال تجل عن الحصر ، ولخص آراءه فى أن الحرارة لابد أن تكون نوعا من الحركة تختص به الجزيئات فى ماسورة المدفع . أما المسمار الأخير فى نعش نظرية السيال فقد دقته

تجارب « جول وكلفن » . وفى الوقت نفسه تقريبا وضع كل من « كلوسيوس وماكسول » نظرية مقبولة تتعلق بسلوك الغازات ، ومبنية على حركة الجزيئات .

٩ — ٢ تجربة جول على المكافئ الميكانيكى للحرارة :

إن فكرة هذه التجربة بسيطة ومباشرة . إذا كانت الحرارة هيئة من هيئات حركة الجزيئات فى جسم فإنه لزيادة الحرارة لابد من عمل شغل ميكانيكى . إذا كانت هناك مجموعة بدالات متحركة بين عوارض جانبية مثبتة فى جدار مسعّر ، وكانت البدالات ساكنة فى ماء المسعر المغمورة فيه وفى نفس درجة حرارته ، فإنه لايوجد تبادل حرارى لا على أساس نظرية الحركة ولا على أساس نظرية السيال . ولكن إذا أديرت البدالات فى الماء ، فإنه حسب نظرية السيال تظل القيمة الكلية للسيال الحرارى ثابتة ، وإذن لا ترتفع درجة الحرارة . ولكن نظرية الحركة تحتم ارتفاع درجة حرارة الماء والبدال لأن هناك شغلا ديناميكيا يعمل على المجموعة بسبب الاحتكاك بين الماء والبدال ، وهذا الشغل يظهر على شكل زيادة فى طاقة حركة الجزيئات ، ويدل ارتفاع درجة الحرارة على مقدار هذه الزيادة . ولقد نجح « جول » فى ابتكار تجربة مؤسسة على هذا الرأى ، لا تدل على إمكان تحول الشغل الميكانيكى إلى طاقة حرارية فقط ، بل أيضاً على مقدار الشغل اللازم لإحداث وحدة كمية الحرارة .



(شكل ٩ — ١)

ويبين شكل ٩ — ١ رسماً تخطيطيا لتجربة « جول » ، حيث تعلق كتلة ك من نهاية خيط ملفوف حول مغزل . عند سقوط الكتلة يدور محور البدالات المتصل بالمغزل فتدور البدالات فى حمام مائى معزول حراريا عن الغرفة لمنع أى تسرب ممكن للحرارة . مقدار الشغل الميكانيكى المبذول هو النقص فى طاقة الوضع الذى

يحدث للكتلة ك بسقوطها مسافة ف أى ك . ح . ف ، وبما أن كمية الماء كبيرة بالنسبة لكتلة المحرك والمحتوى فيمكن إهمال كمية الحرارة الصغيرة التى يمتصها الأخيران . لذا فإن ارتفاع درجة حرارة الحمام يصبح مقياسا لكمية الحرارة المتولدة .

من الناحية الوصفية : كمية الحرارة المتولدة تتناسب مع الشغل المبذول ، فهى تزيد بزيادته ولابد أن تكون ناشئة منه . وهذا يظهر على شكل ارتفاع درجة الحرارة الذى يتناسب طرديا مع الطاقة التى تبذلها البدالات .

من الناحية الكمية : لرفع درجة حرارة جرام من الماء درجة مئوية واحدة يلزم طاقة مقدارها ٤,٢ × ١٠^٧ إرج أى ٤,٢ چول . تسمى هذه الكمية من الطاقة بالسعر .

إن تجربة « جول » وكثيراً من التجارب التى تبعتها قد وضعت أساسا تجريبيا ثابتا للفكرة الكينيتيكية للحرارة . والخطوة التالية هى أن نسأل عما إذا كان من الممكن ابتكار نظرية تضم تفسيرات لجميع الظواهر الحرارية الأخرى ، مثل الضغط الذى يحدثه غاز نتيجة ارتفاع درجة حرارته ، أو تبخر سائل وغليانه ، أو ذوبان جسم صلب . مثل هذه النظرية قد أمكن بالفعل تحقيقها ، ولكن تعقيدها — إلا فيما يختص بالغازات — يقلل من صلاحيتها فى التمهيد لدراسة الفيزياء الذرية . وقد أنشأ هذه النظرية كل من « كلوسيوس » و « ماكسول » وأسمياها بالنظرية الكينيتيكية (أو نظرية الحركة) للغازات ، وهى مؤسسة تأسيسا كاملا على الفكرة الديناميكية للحرارة .

٩ — ٣ نظرية الحركة للغازات :

كأية نظرية فى العلوم يتوصل إليها بالطريقة الاستقرائية يجب ، أولا وقبل كل شىء ، استعراض الأدلة التجريبية التى تؤسس عليها الفروض ثم تختبر النظرية . تتلخص الملامح الأساسية لهذه الأدلة فى النبذ الآتية :

١ — الحرارة نوع من الحركة الجزيئية .

٢ — درجة الحرارة (أى مقياس شدة الحرارة) تتناسب فى التقدير المطلق لها مع الطاقة الحرارية .

٣ – كل الغازات (إلى درجة كبيرة من الصحة) تتبع القانون العام للغازات.

ض ع = س م ر

٤ – تتبع الغازات قانون « أفوجادرو » : فى ض . ء . ع (الضغط درجة الحرارة العياريين) تحتوى الحجوم المتساوية من الغازات على العدد نفسه من الجزيئات.

ولكيلا تتسع النظرية فى يدنا سوف نقترح فروضاً مبسطة (يمكن فحص صلاحيتها فيما بعد) تتعلق بالغازات المحصورة وهى :

١ – حجوم الجزيئات نفسها مهملة بجانب الحجم أو الحيز الذى يشغله الإناء الحاوى.

٢ – جميع التصادمات بين الجزيئات، أو بين الجزيئات وحوائط المحتوى مرونية، بمعنى أن ط . ق تحتفظ بقيمتها.

٣ – لا توجد قوى داخلية بين الجزيئات خلاف القوى التى يظهرها تصادم الجزيئات.

الغاز الذى يتبع مجموعة الفروض السابقة يسمى بالغاز المثالى. وتحت الضغوط العادية، وفى درجات الحرارة المعتادة يمكن اعتبار معظم الغازات « مثالية » إلى درجة كبيرة من الصحة.

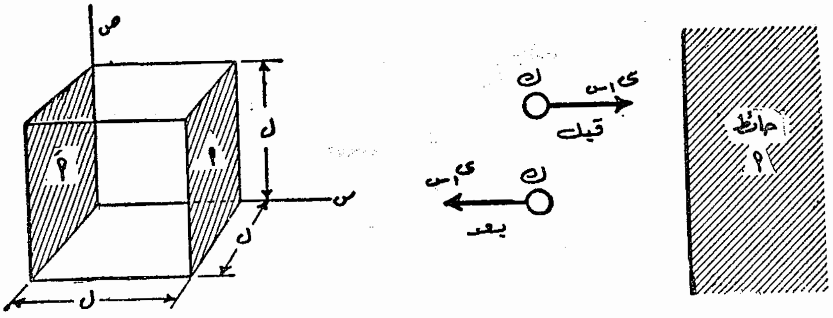
بهذه الأدلة والشواهد ومجموعة التقريبات المشار إليها، يمكن أن نبدأ فى عمل نموذج نجرى عليه الحسابات.

لنفرض أن لدينا مكعباً طول ضلعه ل يحوى عدداً كليا ه من الجزيئات المتشابهة، وأن كتلة كل جزىء ك جم. نفرض أن هذه الجزيئات فى حالة حركة، ولكننا لا نتطلب أن تتحرك جميعها بنفس السرعة. فى الواقع سوف نفرض أن جميع السرعات من صفر إلى قيم كبيرة جدا موجودة. حسب القانون الأول للحركة لنيوتن يتحرك الجزىء الواحد منها بسرعة منتظمة، وفى خط مستقيم ما لم تؤثر عليه قوة خارجية. تنشأ هذه القوة الخارجية من تصادم بجزىء آخر معه أو تصادمه مع الجدار. لنبحث تأثير التصادمات مع الجدار. وللتخلص من حساب التصادمات مع

الجزيئات الأخرى سوف نتصور إزالتها جميعها ماعدا جزئيا واحد ، ونراقب حركة هذا الجزيء . نسمى هذا الجزيء برقم ١ ، ونفرض أن سرعته $ى_{١}$ لها مركبات $ى_{١س}$ ، $ى_{١ص}$ ، $ى_{١ع}$ فى اتجاه محاور الأحداثيات الثلاثة س ، ص ، ع . وإذا حصرنا انتباهنا فى الاتجاه س (شكل ٩ ـ ٢) فإن الزمن اللازم لجزيء لينتقل من الحائط أ إلى الحائط أ ، ثم ثانية إلى أ على طول الاتجاه السينى هو :

$$ن = \frac{٢ ل}{ى_{١س}} \text{ ثانية}$$

وفى رحلة الذهاب والإياب هذه يصدم الجزيء ١ الحائط أ مرة واحدة . إذن عدد التصادمات مع الحائط أ فى الثانية هو مقلوب الزمن اللازم للتصادم الواحد ، أى : $\frac{ى_{١س}}{٢ ل}$ تصادم / ث . هذه التصادمات مرونية فرضا ، ومن النوع الذى تكلمنا عنه فى بند (٧ ـ ٤) وهو حالة كتلة متناهية فى الصغر تصدم كتلة متناهية فى الكبر (الحائط) . وكما رأينا هناك ، فإن التغير فى كمية الحركة التى يكتسبها الجزيء هو ٢ ك $ى_{١س}$ (المعادلة ٧ ـ ٨) وبقاعدة بقاء كمية الحركة فإن هذه



(شكل ٩ ـ ٢)

الكمية نفسها (ولو بإشارة مضادة) يجب أن تعطى للحائط نتيجة التصادم . كمية الحركة الكلية التى يستقبلها الحائط فى الثانية هى :

$$٢ ك ى_{١س} \frac{ى_{١س}}{٢ ل} = \frac{ك ى^{٢}_{١س}}{ل} \text{ جم . سم / ث / ث}$$

ولكن التغير فى كمية الحركة فى الثانية ما هو إلا القوة على الحائط الناشئة من الجزىء رقم ١ (انظر بند ٧ ـــ٣) . وإذا أدخلنا الآن الباقى من الجزيئات التى عددها الكلى $ن$ ، فإن كل جزىء سوف يكون له مركبة سينية تحدث قوتها على الحائط ا . إذن القوة الكلية فى الاتجاه السينى الناتجة من جميع الجزيئات $ن$ هى :

$$ق_{س} = \frac{ك\, ى^{٢}_{١س}}{ل} + \frac{ك\, ى^{٢}_{٢س}}{ل} + \cdots + \frac{ك\, ى^{٢}_{ن س}}{ل}$$

$$= \frac{ك}{ل} \left(ى^{٢}_{١س} + \cdots + ى^{٢}_{ن س} \right)$$

وإذا اعتبرنا المركبات ص ، ع لسرعة الجزيئات بنفس الكيفية ، فإن :

$$ق_{ص} = \frac{ك}{ل} \left(ى^{٢}_{١ص} + ى^{٢}_{٢ص} + \cdots + ى^{٢}_{ن ص} \right)$$

$$ق_{ع} = \frac{ك}{ل} \left(ى^{٢}_{١ع} + ى^{٢}_{٢ع} + \cdots + ى^{٢}_{ن ع} \right)$$

والآن ، فإنه لا توجد مشاهدة تجريبية واحدة تدل على أن الغاز يعمل قوة فى اتجاه معين أكبر من القوة التى يعملها فى اتجاه آخر ، لذا يجب أن نفرض أن :

$$ق_{س} = ق_{ص} = ق_{ع} = ق$$

حيث $ق$ (بدون دليل أسفل الرمز) هى القوة على أى حائط ، الناشئة من حركة جزيئات الغاز . لذا فإن $ق_{س} + ق_{ص} + ق_{ع} = ٣ ق$. وبصياغة الجمع

$$٣ ق = \frac{ك}{ل} \left(ى^{٢}_{١س} + ى^{٢}_{١ص} + ى^{٢}_{١ع} + \cdots + ى^{٢}_{ن س} + ى^{٢}_{ن ص} + ى^{٢}_{ن ع} \right)$$

فى بند (٢ ـــ ٥) ، بينا أن قيمة المحصلة الموجهة بدلالة مركباتها فى الاتجاهات س ، ص ؛ ع هى :

$$ى^{٢} = ى^{٢}_{س} + ى^{٢}_{ص} + ى^{٢}_{ع}$$

لذا ، فإنه يمكن كتابة معادلة القوة بدلالة محصلات السرعة :

$$٣ ق = \frac{ك}{ل} \left(ى^{٢}_{١} + ى^{٢}_{٢} + \cdots + ى^{٢}_{ن} \right)$$

وكما ذكرنا ، تأخذ سرعات الجزيئات جميع القيم . وبما أننا لا نعرف قيم هذه السرعات فإننا نحل السرعة المتوسطة محل السرعات المفردة . وبما أن السرعات تظهر مربعة فى معادلة القوة ، فمن الطبيعى أن نلجأ إلى تعريف متوسط المربع . نتبع فى هذا التعريف الإجراء المتبع للتعبير عن أى متوسط : المجموع مقسوما على عدد الكميات المضافة . وباتباع هذه القاعدة :

$$\text{متوسط } ى^2 = \overline{ى^2} = \frac{ى_1^2 + ى_2^2 + \cdots + ى_ن^2}{ن}$$

يسمى هذا المقدار بمتوسط مربع السرع ، وجذره التربيعى $\sqrt{\overline{ى^2}}$ يسمى بجذر متوسط مربع السرع . وباستخدام متوسط مربع السرع ، يصبح :

$$٣ ق = \frac{ك}{ل} ن \overline{ى^2} \quad (\text{أو}) \quad ق = \frac{1}{3} \frac{ك}{ل} ن \overline{ى^2}$$

وبالقسمة على $ل^2$ ينتج عندنا فى الطرف الأيمن القوة على وحدة المساحة من الحائط ، أى الضغط على الحائط .

$$ض = \frac{ق}{ل^2} = \frac{1}{3} \frac{ك}{ل^3} ن \overline{ى^2} = \frac{1}{3} \frac{ك}{ح} ن \overline{ى^2}$$

حيث $ل^3 = ح$ (حجم المكعب) . وبإعادة الكتابة :

$$ض ح = \frac{1}{3} ن ك \overline{ى^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٩ - ١)$$

المعادلة (٩ ــ ١) إحدى النتائج الأساسية لنظرية الحركة للغازات . فإنها تربط كميات قابلة للقياس ، الضغط والحجم ، فى الطرف الأيمن بكميات ديناميكية لكتلة الجزىء ومتوسط مربع سرعته فى الطرف الأيسر .

٩ — ٤ السرعات الجزيئية :

باستنتاج بسيط من المعادلة (٩ — ١) يمكن حساب الجذر التربيعى لمتوسط مربع السرعات لجزيئات الغازات المختلفة . اعتبر المضروب ك ﻧ . إنه لم يخرج عن كونه الكتلة الكلية للغاز فى الصندوق ، أى أن $\frac{\text{ﻧ ك}}{\text{ح}}$ هو كثافة الغاز ρ

$$\text{إذن } \rho = \frac{\text{ﻧ ك}}{\text{ح}} \text{ جم / سم}^{٣}$$

$$\text{أى أن ض} = \frac{١}{٣} \, \frac{\text{ﻧ ك}}{\text{ح}} \, \overline{\text{ى}^{٢}} = \frac{١}{٣} \rho \, \overline{\text{ى}^{٢}}$$

$$\text{أو الجذر التربيعى لمتوسط مربع السرعات} = \sqrt{\overline{\text{ى}^{٢}}} = \sqrt{\frac{٣\,\text{ض}}{\rho}} \quad \ldots \quad (٩ - ١)$$

بالنسبة للأزوت ρ هى ٠,٠٠١٢٦ جم / سم^{٣} فى م . ض . د . (٠° م ، ١,٠١ × ١٠^{٦} داين / سم^{٢}) . إذن الجذر التربيعى لمتوسط مربع سرعة جزيئات الأزوت هو

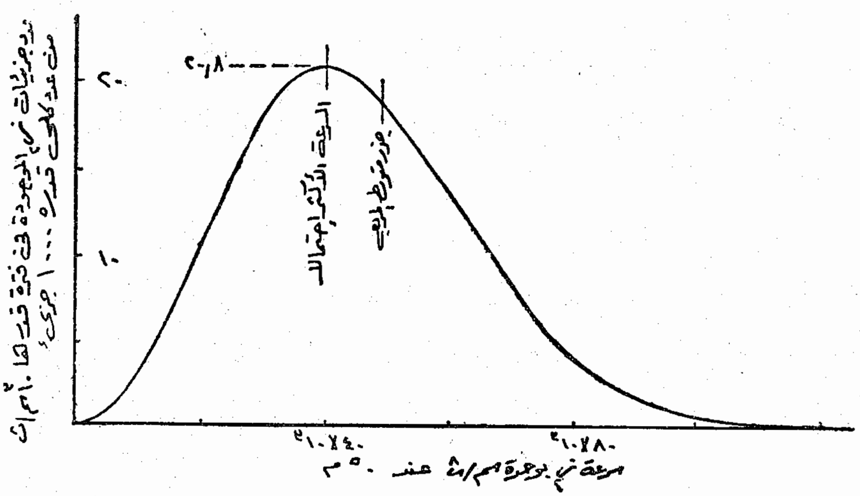
$$\sqrt{\overline{\text{ى}^{٢}}} = \sqrt{\frac{٣ \times ١,٠١ \times ١٠^{٦}}{٠,٠٠١٢٦}} = ٤,٩٣ \times ١٠^{٤} \text{ سم / ث} .$$

أى ما يقرب من ١١٠٠ ميل / ساعة . ويبين جدول (٩ — ١) الجذر التربيعى لمتوسط مربع سرعة جزيئات بعض الغازات فى م . ض . د .

جدول ٩ — ١

الغاز	الجذر التربيعى لمتوسط مربع السرعة
الهيدروجين	١٨,٣٩ × ١٠^{٤} سم / ث
الهليوم	١٣,١٠
بخار الماء	٦,١٥
النتروچين	٤,٩٣
الأكسجين	٤,٦١
الأرجون	٤,٣١

فى حالة الأيدروجين والهليوم، الجذر التربيعى لمتوسط مربع السرعات قريب من سرعة التسرب ، وهى السرعة التى يجب أن تلازم الجسم لكى يستطيع التغلب على مجال الأرض الجاذبى وهى تقريبا ١٫١ × ١٠^٦ سم / ث أى ما يقرب من ٧ ميل / ث . وحيث إن سرعة كثير من جزيئات الغاز أكبر من الجذر التربيعى لمتوسط مربع سرعاته ، فإن كسورا من العدد الكلى لجزيئات الغاز تتسرب باستمرار من مجال الجاذبية الأرضية ، وهذا الكسر محسوس فى حالة الجزيئات الخفيفة . ومن المشاهدات العملية أن جو الأرض خال تقريباً من الهيدروجين والهليوم . وربما منذ ملايين السنين فى الماضى السحيق كانت هذه الغازات جزءا محسوسا من جو الأرض . وعلى أجسام مثل القمر (حيث سرعة التسرب ٢٫٤ × ١٠^٥ سم / ث فقط) ، فإن كسرا محسوسا من الجزيئات الواردة بجدول (٩ — ١) تكون سرعاتها من الكبر بحيث تترك جو القمر وتهرب . والمعروف أنه ليس للقمر جو .



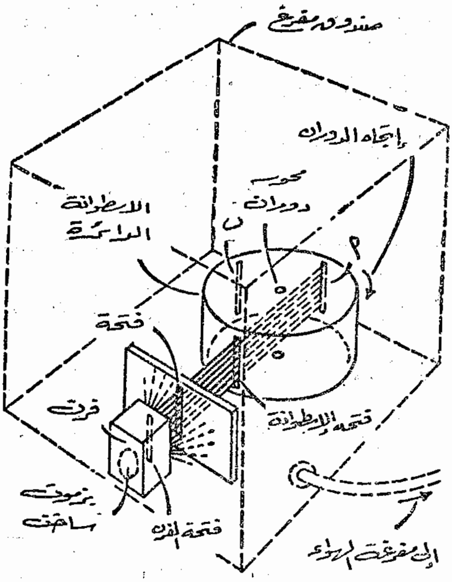
(شكل ٩ — ٣)

استخدمنا إلى الآن جذر متوسط مربع السرع بدون أن نشير إلى كيفية توزيع السرع حول هذه القيمة . إن حساب كيفية هذا التوزيع بالطرق الرياضية معقد وفوق مستوى هذا الكتاب . وكل ما يمكن أن نذكره هو أن نتيجة الحساب تتمثل على أحسن وجه بمنحن مرسوم من دالة التوزيع لماكسول وبولتزمان ، وهى بدورها مشتقة

من قوانين الاحتمالات كما طبقت على نظرية الحركة للغازات . فالمنحنى المبين بشكل (٩ — ٣) مرسوم ليمثل حالة ١٠٠٠ جزىء من الأزوت فى ٠° م طبقا لنتائج دالتهما . ويمكن من هذه الدالة رسم منحنى أى غاز آخر فى أى درجة حرارة أخرى . فارتفاع المنحنى عند أى نقطة (شكل ٩ — ٣) يمثل عدد الجزيئات (التى تقع سرعاتها فى مدى قدره ١٠^٣ سم / ث حول هذه النقطة) فحيث يكون الارتفاع كبيرا عند أى نقطة من المنحنى يدل على أن عدداً كبيرا من الجزيئات حول السرعة التى تمثلها هذه النقطة . نرى من المنحنى (شكل ٩ — ٣) أن قمته تمثل سرعة قدرها ٤٠ × ١٠^٣ سم / ث . وهذا معناه أن أكبر عدد من الجزيئات فى الغاز تتراوح سرعتها فى المدى المدون (٣ × ١٠^٣ سم / ث حول هذه النقطة . وتمثل القمة السرعة الأكثر احتمالا . أما جذر متوسط مربع السرعات فتمثله نقطة تقع على بعد ما إلى اليمين من القمة تبين أن سرعة جذر متوسط المربعات أعلى من السرعة الأكثر احتمالا وأكبر منها ١,٢٢٥ مرة .

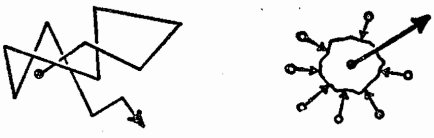
ويمكن أن ننظر إلى ارتفاع أية نقطة على هذا المنحنى على أنها احتمال وليست عدداً . . أى احتمال أن يأخذ جزىء معين سرعة معينة فى مدى صغير معين . من الرسم نرى أن هذا الاحتمال يقل سواء إلى يمين أو يسار القمة . وهذا معناه أن الاحتمال يقل فى أن يأخذ سرعة أكبر أو أصغر من السرعة الأكثر احتمالا . فمثلا احتمال أن يأخذ الجزىء سرعة ضعف السرعة الأكثر احتمالا هو ٢٠ ٪ (من احتمال حصوله على سرعة القمة) . واحتمال أن يأخذ الجزىء سرعة ثلاثة أمثالها ضعيف جدا لا يكاد يذكر . وهذا يفيد أن جميع الجزيئات تقريبا لا تزيد سرعاتها عن السرعة الأكثر احتمالا (سرعة القمة) إلا بمضروب بسيط فقط .

إن دالة التوزيع التى يمثلها شكل (٩ — ٣) قد أمكن إثباتها بتجارب عدة مباشرة . والإجراء الذى اتبعه « زارتمان » فى البرهنة عليها مبين بشكل (٩ — ٤) حيث يتبخر البزموت عند درجة الغليان فى فرن مفرغ . وتصدر حزمة رفيعة من ذرات البزموت مارة من النظام المبين ذى الفتحتين المستطيلتين . وهناك أسطوانة مفرغة ذات فتحة مماثلة تدور بسرعة كبيرة حول محور مواز لهذه



(شكل ٩ — ٤)

الفتحات ، وفى خط مستقيم معها ، كما بالشكل . مرة فى كل دورة تدخل الحزمة الذرية الأسطوانة . وما يجب أن نلفت إليه النظر هو أن الذرات فى الحزمة حرة وخالية تماماً من تأثير الأسطوانة فلا تدور معها ، بل تصدم الأسطوانة فى أية نقطة على سطحها الداخلى ، وتكون فى لحظة التصادم أمام فتحتها بعد أن تكون الذرات قد قطعت مسافة تساوى قطر الأسطوانة . وللأسطوانة سرعة معينة تحددها ظروف كل تجربة ، وكل نقطة من سطحها أمامها فرصة لتصطدم بجزىء سريع أو بطىء حسب موقعها من الشعاع . تهيأ سرعة الأسطوانة بحيث إن النقطة التى أمام فتحتها (مثلا) تستغرق فى دورة كاملة زمناً يساوى الزمن الذى تستغرقه أكثر السرعات الذرية احتمالاً لقطع قطر الأسطوانة . ففى الرسم تصطدم الذرات التى لها هذه السرعة الأكثر احتمالا مع النقطة ا (بعد دورة كاملة) ، وتصطدم الذرات التى لها سرعات أبطأ كثيراً مع النقطة ب (التى تصل إلى موضع ا بعد دورة وجزء من الدورة) لاستغراقها زمناً أطول فى قطع قطر الأسطوانة . أما الذرات الأسرع كثيرا فتصطدم فى نقطة على يمين ا غير مبينة بالرسم (تصل إلى موضع ا فى أقل من دورة) . وعندما تكون الأسطوانة باردة ، فإن ذرات البزموت تستقر على سطحها وتلتصق به عند الاصطدام مكونة طبقة سمكها أكبر فى النقطة التى تقابل أكثر السرعات احتمالا ، وأقل سمكاً فى النقط التى تقابل السرعات الأقل احتمالا . وبعبارة أخرى ، فإن سمك الطبقة المترسبة عند أية نقطة تتناسب مع عدد الذرات التى تمكنها سرعتها من قطع قطر الأسطوانة فى اللحظة التى تكون فيها النقطة المذكورة أمام فتحة الأسطوانة . وبقياس سمك الطبقة حول النقطة ا إلى مسافات طويلة على الجانبين قد تمكن


(أ) (ب)

(شكل ٩ - ٥)

« زارتمان » من الحصول على منحن شبيه بالمنحنى المرسوم فى شكل (٩-٣) وذلك برسم طول الشريط ابتداء من ا (يمينا ويسارا) على محور السينات وسمك الطبقة على محور الصادات . وبالنسبة للسرعات الجزيئية الكبيرة (حوالى ٣ × ١٠^٤ سم/ث للسرعة الأكثر احتمالا لذرات البزموت فى فرن تجربة زارتمان) ، فإن الأسطوانة يجب أن تدور بسرعة كبيرة لإمكان الحصول على شريط ذى طول محسوس على الجانبين ، ولقد استخدم زارتمان سرعة تقرب من ٢٤٠ دورة / ث .

٩ ــ ٥ الحركة البراونية :

إن الفروض الأساسية لنظرية الحركة ، وهى أن جزيئات الغاز فى حالة حركة سريعة وتتصادم باستمرار مع بعضها البعض ومع الجدار الحاوى لها ، قد وجدت سنداً تجريبيا فى تحليل ما يسمى بالحركة البراونية للجسيمات المجهرية . اكتشف هذه الظاهرة العالم النباتى « براون » عام ١٨٢٧ ، فقد لاحظ « براون » أن الجسمات الدقيقة المعلقة فى وسط مثل جسيمات الدخان فى الهواء تتحرك حركة مستمرة هوجاء لا ضابط لها ، وأن مسار الجسيم الواحد منها يمكن أن يمثل بشكل (٩ ــ ٥) ا . ولقد مر ما يقرب من ٥٠ عاماً قبل أن تفهم الأهمية الحقيقية للحركة البراونية. إن دقيقة الدخان المعلقة الصغيرة (وهى ذات حجم يسمح برؤيتها فى الميكروسكوب) تتكون من آلاف الجزيئات المجمعة وهذه كقطعة واحدة تصطدم باستمرار مع الجزيئات المفردة للغاز شكل (٩ ــ ٥) ب . وحيث إن جسيم الدخان بالرغم من تركيبه المشار إليه صغير ، فقد يتفق أن يتلقى من جزيئات الغاز صدمات فى جانب أشد من الصدمات فى الجانب المقابل فيتحرك الجسيم بتأثير محصلة قوى التصادم ، ثم لا يلبث أن يعانى صدمات جديدة تغير مسيره فيبدو عشوائيا . إن المشاهدة الدقيقة لهذه الحركات قد بينت أن متوسط طاقة حركة الجسيم يساوى متوسط الطاقة لجزىء الغاز المعلق فيه مما يتفق مع نظرية الحركة للغازات .

٩ ــ ٦ طاقات الحركة للجزيئات :

لكي نتحقق من صحة نظرية الحركة للغازات يجب تعريضها لمحك التجربة . وإلى الآن فإن التنبؤ بسرعات الجزيئات وتوزيعها قد أمكن البرهنة عليه بتجربة زارتمان ، كما أن النظرية قد أمدتنا بتفسير معقول لعدم وجود جو للقمر وللحركة البراونية . ومن المهم الآن أن نسأل عن الكيفية التي تبرر بها هذه النظرية القانون العام للغازات : $\text{ض ح} = \text{س م ر}$.

إذا رجعنا إلى معادلة النظرية وهي (٩ ــ ١) نجد أن :

$$\text{ض ح} = \frac{1}{3}\,\text{ن ك}\,\overline{\text{ى}^{2}}$$

فكأنه على هذا الأساس يجب أن :

$$\frac{1}{3}\,\text{ن ك}\,\overline{\text{ى}^{2}} = \text{س م ر}$$

وحيث إن س عبارة عن عدد الجرامات الجزيئية التي يحتويها الغاز في ض . د . ع ، فإن $\frac{\text{ن}}{\text{س}}$ عبارة عن عدد جزيئات الغاز في الجرام الجزيئي .

تسمى هذه النسبة بعدد أموجادرو ($\text{ن}_{\text{.}}$)

أي أن $\text{ن}_{\text{.}} = \frac{\text{ن}}{\text{س}}$ = عدد الجزيئات في الجرام الجزيئي من المادة .

وقد أعطت التجربة قيمة لهذا العدد (انظر بند ١٣ ــ ٦) وهي :

$\text{ن}_{\text{.}} = ٦,٠٢ \times ١٠^{٢٣}$ جزيئا في الجرام الجزيئي

إذن $$\frac{\text{ن ك}\,\overline{\text{ى}^{2}}}{\text{٣ س}} = \text{م ر}$$

أو $$\frac{1}{3}\,\text{ن}_{\text{.}}\,\text{ك}\,\overline{\text{ى}^{2}} = \text{م ر}$$

مما يعطي $$\text{ر} = \frac{1}{3}\,\frac{\text{ن}_{\text{.}}\,\text{ك}\,\overline{\text{ى}^{2}}}{\text{م}} = \frac{2}{3} \times \frac{1}{\text{م}}\left(\frac{1}{2}\,\text{ن}_{\text{.}}\,\text{ك}\,\overline{\text{ى}^{2}}\right) \quad \ldots (٩ - ٣)$$

$$= \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\text{م}} \;(\text{متوسط طاقة الحركة للجزيئات})$$

أى أن درجة الحرارة المطلقة ما هى إلا مقياس لطاقة الحركة المتوسطة للجزيئات . على هذا الأساس يكون متوسط طاقة الحركة صفراً فى درجة الصفر المطلق . فمن الواضح أنه لابد وأن يوجد صفر مطلق لدرجة الحرارة ، لأننا لا نستطيع أن نتصور طاقة حركة أقل من الصفر (أى سالبة) .

نستنتج من ذلك أن نظرية الحركة لجزيئات الغاز تتفق مع دليلين هما ٢ ، ٣ من بين الأدلة الواردة فى بند (٩ — ٣) وهما الخاصتان بالعلاقة بين الطاقة الحرارية ودرجة الحرارة (المطلقة)، كما تتفق مع القانون العام للغازات . وقد يكون من المفيد على سبيل التمثيل حساب المحتوى الحرارى الكلى لكمية معينة من غاز فى حالة معينة . لنعتبر جزيئا من غاز فى الضغط العيارى وفى درجة حرارة الغرفة (٢١° م = ٢٩٤° ك) . بإعادة كتابة المعادلة (٩ — ٣) نجد أن :

$$\overset{\frown}{\text{ط . ع}}\ \text{للغاز} = \frac{٣}{٢}\ \text{م}\ \text{ر}$$

$$= \frac{٣}{٢} \times ٨{,}٣١ \times ١٠^{٧} \times ٢٩٤$$

$$= ٣{,}٦٦ \times ١٠^{١٠}\ \text{إرج} = ٣{,}٦٦ \times ١٠^{٣}\ \text{جول}$$

وهذه هى كمية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام جزيئى (من أى غاز) بصرف النظر عن نوعه ، من درجة الصفر المطلق إلى درجة حرارة الغرفة .

٩ — ٧ قانون أفوجادرو :

وأخيرا ، فإن نظرية الحركة يجب أن تمكننا من اشتقاق قانون أفوجادرو وهو : الحجوم المتساوية من الغازات فى ض . د . ع تحوى عددا متساوياً من الجزيئات . لنفرض أن عندنا نوعين من الغازات أحدهما نرمز إليه بالدليل ١ والآخر نرمز إليه بالدليل ٢ .

نكتب المعادلة (٩ — ١) مرتين :

$$\text{ض}_{١}\ \text{ع}_{١} = {}^{١}\ \text{ن}_{١}\ \text{ك}_{١}\ \text{ى}_{١}^{٢} \qquad\qquad \text{ض}_{٢}\ \text{ع}_{٢} = \frac{١}{٣}\ \text{ن}_{٢}\ \text{ك}_{٢}\ \overline{\text{ى}_{٢}^{٢}}$$

لنفرض أن هذين الغازين تحت ضغط واحد وحجمهما واحد أيضا ، أى أن

$ع_١ ض_١ = ع_٢ ض_٢$

إذن $\frac{١}{٣} ن_١ ك_١ \overline{ى_١^٢} = \frac{١}{٣} ن_٢ ك_٢ \overline{ى_٢^٢}$

ولنفرض أنهما أيضا فى نفس درجة الحرارة

إذن $\frac{١}{٢} ك_١ \overline{ى_١^٢} = \frac{١}{٢} ك_٢ \overline{ى_٢^٢}$

أى أن $ن_١ = ن_٢$ الذى هو قانون أفوجادرو

٩ ـ ٨ أهمية عدد أفوجادرو $ن_.$ ، ومغزاه :

إن أهمية عدد « أفوجادرو » فى الفيزياء الذرية تفوق بكثير ما يمكن أن يستدل من وضعه المغمور بعض الشيء فى نظرية الحركة . وإذا قرنا عدد أفوجادرو بالحجم الجزيئى فمن الممكن أن نستخلص منه الحقيقة الهامة الآتية :

« يوجد $٦,٠٢ \times ١٠^{٢٣}$ جزيئا فى الجرام الجزيئى لأى مادة ، وإذا كانت هذه المادة غازاً فى ض . ء . ع فإن $٦,٠٢ \times ١٠^{٢٣}$ جزيئا تشغل حجما قدره ٢٢٤٠٠ $سم^٣$.

تذكر أنه إذا كانت المادة أحادية الذرة ، فإن كلمة « ذرة » تحل محل كلمة « جزىء » و « الجرام الذرى » محل « الجرام الجزيئى » .

من هذه المعلومات يمكن إجراء حسابات هامة مثيرة .

كتلة الجزىء: الجرام الجزيئى من الأيدروجين ($يد_٢$) هو ٢ جم ، وهذه الكتلة تحتوى على $ن_. = ٦,٠٢ \times ١٠^{٢٣}$ جزيئا . من هذا نجد أن كتلة الجزىء الواحد

من الأيدروجين $= \frac{٢}{٦,٠٢ \times ١٠^{٢٣}} = ٣,٣٢ \times ١٠^{-٢٤}$ جم (أو) أن ذرة الأيدروجين وهى نصف هذه القيمة ذات كتلة $= ١,٦٦ \times ١٠^{-٢٤}$ جم . بهذه الكيفية نفسها فإن ذرة اليورانيوم (وهى ذات كتلة ذرية ٢٣٨) لها كتلة

$$\frac{٢٣٨}{٦,٠٢ \times ١٠^{٢٣}} = ٣٩٥ \times ١٠^{-٢٤} \text{ جم .}$$

عدد لوشميت : ما عدد الجزيئات التى تشغل حجما قدره ١ سم^{٣} من الأكسجين (مثلا) فى م . ض . ء ؟ الحجم الجزيئى لأى غاز هو ٢٢٤٠٠ فى م . ض . ء ويحتوى ٦,٠٢ × ١٠^{٢٣} جزيئا . لذا فإن ١ سم^{٣} من أى غاز فى ض . ء . ع يحوى $\frac{٦,٠٢ \times ١٠^{٢٣}}{٢٢٤٠٠}$ = ٢,٦٩ × ١٠^{١٩} جزيئا، ويسمى هذا الرقم بعدد لوشميت . أو ما عدد الجزيئات التى يحتويها ١ جم من الأكسجين مثلا ؟ نعرف أن ٣٢ جم (جرام جزيئى من الأكسجين) يحتوى على ٦,٠٢ × ١٠^{٢٣} جزيئا . لذا فإن ١ جم منه يحتوى $\frac{١}{٣٢}$ × ٦,٠٢ × ١٠^{٢٣} = ١,٨٨ × ١٠^{٢٢} جزيئا . وواضح أن هذا العدد يختلف من غاز إلى آخر .

أبعاد الجزيئات (بطريقة مقربة) : تتحرك جزيئات الغاز بحرية كبيرة فى جميع الاتجاهات كما ذكرنا ، وامتداد نظرية الحركة إلى السوائل والجوامد يأخذ فى الاعتبار أن جزيئات السائل تتحرك بحرية أضيق بكثير منها فى الغازات ، وأن جزيئات الجسم الصلب تكاد تكون متلامسة . وتدل أشعة أكس ، كما تدل ظواهر أخرى ، على أن معظم الأجسام الصلبة لها مظهر هندسى يسمى بالبلورات هى فى الواقع ذرات مرتبة بتماثل فى صفوف متراصة . ولأغراضنا الحالية سوف نهمل هذه الحقيقة ونعتبر ذرات جسم مثل الألومنيوم متلاصقة ومكدسة . وأن هذه الذرات كرية ، ونريد حساب أنصاف أقطارها . كثافة الألومنيوم هى ٢,٧ جم / سم^{٣} ورقم كتلته الذرى ٢٧ . إذن ١ سم^{٣} من الألومنيوم هو عبارة عن ٠,١ جرام ذرى أى أنه يتكون من ٠,١ × ٦,٠٢ × ١٠^{٢٣} = ٦,٠٢ × ١٠^{٢٢} ذرة . وبفرض أن كلا من هذه كرة حجمها $\frac{٤}{٣}$ ط نق^{٣} ، وإذن بطريقة تقريبية

$$٦,٠٢ \times ١٠^{٢٢} \times \frac{٤}{٣} \text{ ط نق}^{٣} = ١ \text{ سم}^{٣}$$

$$\text{إذن نق} = ٣,٤ \times ١٠^{-٨} \text{ سم} .$$

ونحن بطبيعة الحال لا نعول على هذه القيمة كثيرا ، لأنه يهمنا رتبة المقدار فقط ، وهو أن قطر الذرة عبارة عن عدد من المرات قدر ١٠$^{-٨}$ سم .

٩ ــ ٩ قابلية تطبيق فروض نظرية الحركة :

تكلمنا ببعض التوسع لنبين نجاح نظرية الحركة ، ولكننا لم نذكر شيئا عن حدود تطبيقاتها . معظم هذه القيود ترجع إلى الفروض نفسها التى عرضناها . إذا كان الغاز كثيفا ، أى تحت ضغط كبير مثلا ، فإن حجم الجزيئات نفسها يدخل فى الاعتبار ، علاوة على أن هناك قوى جزيئية بين الجزيئات وهذه تصبح عاملاً كبير الأثر عندما تضغط الجزيئات قريبة من بعضها البعض . من أجل هذه الأسباب إلى حد ما ، تعتبر نظرية الحركة فى السوائل والجوامد أكثر تعقيدا منها فى الغازات . والفرض بأن جميع التصادمات مرونية تجعلنا نهمل حقيقة هامة هى أن للجزيئات والذرات تراكيب داخلية ، وقد تذهب بعض الطاقة إلى مكونات هذه التراكيب .

٩ ــ ١٠ المعنى الفلسفى لنظرية الحركة :

إن أظهر النواحى فى ديناميكية « نيوتن » هو دقتها التى تصف بها الحركات الميكانيكية . وقد ساعد هذا النجاح على انتشار الرأى بأن الطبيعة تعمل خلال نظام ديناميكى محقق . فما على المشتغل بالعلم إلا أن يعمل فكره ، ويحلل القوى والحركات الناشئة عنها ، فيتنبأ بكل شىء . مثل هذه الفلسفة عن طبيعة العالم تسمى «بالميكانيكية» فهى تفرض مقدما بأن هناك خطة ثابتة محددة ، ودون شك عالية التعقيد ، تنقاد لها الحوادث . وإذا لم نستطع التنبؤ بدقة عن مجريات الأمور ، فليس ذلك بسبب غموض الطبيعة ، بل بسبب قصور فكرنا الإنسانى وعدم دقة الآلات التى نستخدمها . فإذا نشأ جنس أرقى من الإنسان ، فإنه سوف يجد أمامه كل سر مفتوح وكل تركيب معروف . وقد دفع ذلك بعض الفلاسفة الأقل حرصاً إلى الاعتقاد بأن هذا النظام الحتمى لابد وأن ينطبق أيضا على الأحياء انطباقه على الجماد الأصم . فمثلا ورقة الشجرة محدد أبعادها ومكانها ومعدل نموها كجزء من خطة عامة لا تستطيع مخالفتها أو النمو على غير هواها .

وبدفعة واحدة أوصلت نظرية الحركة هذا النظام إلى قمة اليقين ، ثم تركته يهوى إلى حضيض الشك . ونفسر ذلك فنقول : إن نظرية الحركة قد بينت أن الحرارة ما هى إلا ظاهرة ميكانيكية بحتة ، وأن العمليات الجزيئية ، إنما تخضع

لقوانين نيوتن فى الحركة . فمن وجهة النظر هذه تعتبر نظرية الحركة نجاحاً وتدعيما لقواعد الفلسفة الميكانيكية المشار إليها ، ولكن من وجهة نظر أخرى نجد أنها أدخلت غموضا ، إذ أنها لم تتقدم بأية وسيلة يمكن أن نحدد بها كمية الطاقة التى يمتلكها جزىء مفرد ، ولا يشفع لها فى هذا أنها تستطيع أن تعطينا أكثر القيم احتمالا لطاقة الجزىء . الحقيقة أننا لا يمكننا أن نخص جزيئاً معيناً يعانى ملايين التصادمات فى الثانية بنصيب معين من الطاقة . فسؤالنا عن كمية الطاقة التى يختص بها جزىء مفرد سقيم المعنى .

والخلاصة أنه إذا كان لدى الطبيعة خطة لكل حادثة فى الوجود ، فإنها لابد وأن تكون معقدة غاية التعقيد ، حتى فيما يخص سنتيمترا مكعبا من غاز .

إن فكرة الاحتمال (الحديثة)، بدلا من التحقق التام فى الوسائل التى تعمل بها الطبيعة تبسط أساسا ، على الأقل ، موضوع تحليل الظواهر الذرية والجزيئية ، فهو يترك نهائيا الأفكار المتعلقة بوصف حركة جسيم تحت عتبة الحس بالنسبة لحركته المستمرة المتغيرة ، التى تجل عن الوصف بفرض وجود الوسائل لتركيز انتباهنا عليه . إننا نفقد ثقتنا فى إمكان وصف حركة جسيم وصفا كاملا حتى إذا كانت لدينا الأجهزة الكاملة للقياس . ولسوف تتمخض دراستنا عن الذرات وأجزائها المكونة لها ، عن أفكار جديدة تلقى ضوءاً أكثر على هذا الموضوع الفلسفى الكبير . إن نظرية الحركة كانت أول بصيص يشير إلى وجود هذه الفلسفة على الإطلاق .

تمارين

١ — جسيم شرعته ٥٠٠ م / ث يصطدم باستمرار بين حائطين متقابلين المسافة بينهما ١٠ سم . فإذا كان اصطدامه بالحائطين فى الاتجاه العمودى عليهما ، فما هو الزمن الذى يمضى بين تصادمين متتاليين عند حائط واحد ؟ وما عدد التصادمات الحادثة عند هذا الحائط فى الثانية ؟

الجواب : ٤ × ١٠$^{-٤}$ ث ، ٢٥٠٠ تصادم / ث

٢ — كرات من الصلب تطلق من بنادق هوائية لتصدم حائطا مثبتا من الصلب عمودية عليه . بفرض أن كل كرة مقذوفة تزن ١٠ جم وتصدم الحائط بسرعة ١٠٠ م / ث ، احسب القوة المؤثرة على لوح الصلب (بفرض أن التصادمات مرونية) إذا أطلق عليه ١٠٠٠ مقذوف / ث .

الجواب : ٢ × ١٠^٨ داين

٣ — إذا كانت مركبات سرعة جسيم معين هى : ٣٠ سم / ث فى اتجاه محور السينات، ٦٠ سم / ث فى اتجاه محور الصادات ، ٢٠ سم / ث فى اتجاه محور العينات ، فما سرعة الجسيم ؟

الجواب : ٧٠ سم / ث

٤ — كثافة الهليوم فى م . ض . ء . هى ١,٧٦ × ١٠^-٤ جم /سم^٣ . ما جذر متوسط مربعات السرعة لذرات الهليوم ؟

٥ — ما هى طاقة الحركة الكلية للجزيئات الموجودة فى ٢ جم من الهيدروجين (يد$_٢$) فى ظروف ض . ء . ع ؟

الجواب : ٣,٤٠ × ١٠^١٠ إرج (أو) ٣٤٠٠ چول.

٦ — ما هى الطاقة التى يجب امتصاصها من الغاز الموجود بالمسألة ٥ لكى تنخفض درجة حرارته إلى ١°ك ؟

الجواب : ٣٣٨٧ چول

٧ — ما عدد جزيئات الهيدروجين (يد$_٢$) الموجودة فى ١ سم^٣ فى ض . ء . ع ؟ ما كتلة هذا الحجم من يد$_٢$ ؟ ما كتلة كل جزىء ؟

الجواب : ٢,٧ × ١٠^١٩ جزىء ، ٨,٩ × ١٠^-٥ جم ، ٣,٣ × ١٠^-٢٤ جم.

٨ — إن أحسن فراغ أمكن الوصول إليه فى المعمل هو الذى يقابل ضغطا قدره

10^{-9} سم من الزئبق . ما عدد الجزيئات التى تظل باقية فى كل سم^3 من هذا الفراغ المزعوم ؟

الجواب : ٣٥٤ مليون جزىء

٩ — إذا عمل ثقب صغير فى جدار مصباح كهربى معتاد حجمه ٥٠٠ سم^3 ، وكان المصباح مفرغا تماما من الهواء ، وأدخل من هذا الثقب جزيئات أزوت بمعدل مليون جزىء فى الثانية، فما هو الزمن الذى يمضى لكى يصل الضغط داخل المصباح إلى الضغط الجوى ؟

الجواب : $1{,}34 \times 10^{16}$ ث (أو) ٤٢٦ مليون عام

مراجع مقترحة للاطلاع

Born, Max, "The Restless Universe", London, Blackie & Son, 1935.

الباب الأول هو مناقشة شائقة حول نظرية الحركة

Dampier, Sir William, "A history of Science", New York, The Macmillan Co., 1946.

تعالج الصفحات ٢٤٥ — ٥٧ النظرية الميكانيكية للحرارة ونظرية الحركة للغازات .

Eddington, Sir Arthur, "The Nature of Physical World", New York, The Macmillan Co., 1933.

يحوى الباب الرابع عرضا شائقا لمعنى الاحتمال وإمكان الحصول على الطاقة الحرارية . ويقرأ بسهولة .

Jeans, Sir James, "The Mysterious Universe", New York. The Macmillan Co., 1937.

الباب السابع يستعرض تاريخ تطور نظرية الحركة .

Magie, W. F. "Source Book in Physics", New York, McGraw-Hill Book Co., 1935.

ورد بالصفحة ٢٠٣ مقتطفات من تجارب جول عن المكافئ الميكانيكي للحرارة ، كما ورد بالصفحة ٢٤٧ معالجة برنولى الأولى (١٧٣٨) عن الضغط من وجهة نظر نظرية الحركة للغازات . وورد بالصفحة ١٤٦ تجربة رمفورد عن إنتاج الحرارة .

Mott-Smith, M., "The Story of Energy", New York, D. Appleton-Century Co., 1934.

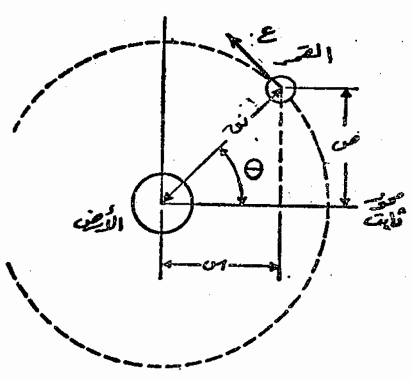
تحوى الأبواب من ٧ إلى ١٥ مناقشة سهلة الفهم عن الحرارة والطاقة .

الفصل العاشر

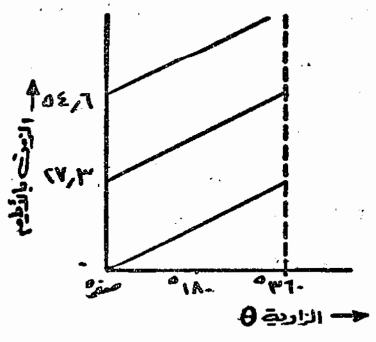
الحركات الدورية والموجات

١٠ – ١ الحركات الدورية :

تقسم الحركات الميكانيكية عادة إلى نوعين : الحركات التى تبدأ من نقطة وتنتهى عند نقطة أخرى ، مثل جسم يسقط ، والحركات التى تكرر نفسها مثل حركة القمر حول الأرض . وأبسط الحركات المتكررة ، بل أكثرها شيوعاً الحركات المنتظمة التكرار . فهى تتكرر فى فترة زمنية معينة ، وفى كل فترة تقوم بنفس الحركة تماماً . يطلق على هذه الحركة اسم الحركة الدورية ، وتسمى الفترة الزمنية المتكررة بزمن الدورة أو المدة فحركة القمر هى حركة دورية مدتها ٢٧,٣٣ يوماً ، يستغرقها فى عمل دورة حول الأرض . ونحن نعلم أن هذه الحركة قد تكررت بنفس



(شكل ١٠ – ١)



(شكل ١٠ –٢)

المدة على الأقل طيلة آلاف السنين التى دونت فيه المشاهدات الفلكية .

ولإمكان تتبع الموضوع ، ولكى نحدد المقصود بهذة الحركات المتكررة ، لابد من دراسة الصورة المضبوطة للحركة خلال دورة . وكمثال نعتبر حركة القمر

(شكل ١٠ ــ١) . تنشأ دورة القمر نتيجة لقوة جاذبية الأرض التى تعطى القمر عجلة مركزية ثابتة القيمة مقدارها $\frac{ع^{2}}{نق}$ حيث ع سرعة القمر الأولى فى مداره ، نق المسافة من مركز الأرض إلى مركز القمر ، وهما قيمتان ثابتتان تقريباً . ولوصف الخاصية الدورية للقمر ، لابد أن نختار كمية قابلة للقياس ونبحث تغيرها مع الزمن . ويعتبر اختيار المتغير فى مثل هذه الأمور من الأهمية بمكان ، لأن هناك اختيارات معينة فقط هى التى تعطى أبسط الحلول . وفى موضوع القمر نختار الزاوية θ بين خط الأرض ــ القمر وبين أى محور ثابت فى الفضاء فى مستوى دوران القمر . ومن الواضح أن هذه الزاوية تزيد باستمرار مع الزمن ، كما بشكل ١٠ ــ ٢ حيث يحسب الزمن ابتداء من اللحظة التى فيها θ = صفراً ، ثم تتكرر الزيادة بتكرر الدورات .

وهناك اختيار آخر هو المسافة س شكل (١٠ ــ ١) التى تنتهى بمسقط موضع القمر اللحظى ــ على المحور الثابت . هذه المسافة هى فعلا متغير آخر مناسب ، إذ أنه لاتوجد سوى قيمة واحدة للمقدار س ، لها اتجاه التغير نفسه ــ بالزيادة أو النقص مثلا ــ لكل موضع للقمر . والآن فإن س لاتزيد بانتظام مع الزمن ــ خلال أى دورة ــ كما تفعل θ ، بل إن س فى الواقع تحقق المعادلة*

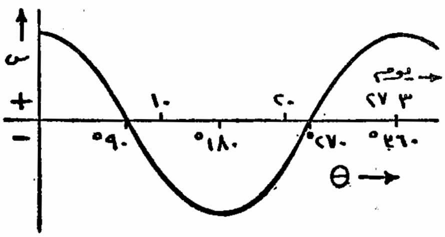
$$س = \sqrt{نق^{2} - ص^{2}}$$

ومن الناحية البيانية تتغير س مع الزاوية θ والزمن ن كما بشكل (١٠ ــ ٣) والغريب أن اختيار س كمتغير أوفق فى أحوال كثيرة من اختيار الزاوية θ ، ولو أن س لا تزيد بانتظام مع الزمن . والواقع أن الحركات التى يزداد أو ينقص فيها المتغير مع الزمن بالكيفية المبينة بشكل (١٠ ــ ٣) شائعة جداً ، وتسمى

* وهناك علاقة أنسب من هذه تستخدم حساب المثلثات هى س = نق جتاθ ، حيث θ تزيد بانتظام مع الزمن .

بالحركات الدورية البسيطة أو الحركات التوافقية البسيطة . ويسمى التغير مع الزمن بالتغير الموجى أو التغير الجيبى .

ويمكننا أن ننفذ ببصرنا بعض الشيء إلى هذه الحركات ، باعتبار القوى المؤثرة على القمر من وجهة نظر مختلفة قليلا . نعرف أن القوة المؤثرة على القمر عبارة عن قوة ثابتة متجهة إلى الأرض تسببها الجاذبية الأرضية . يمكن تحليل هذه القوة ق إلى مركبتين $ق_س$ فى اتجاه س والأخرى $ق_ص$ فى اتجاه ص . وكل من



(شكل ١٠ – ٣)

هاتين المركبتين غير ثابتة مع الزمن ، ولو أن محصلتهما الموجهة ثابتة مع الزمن . لنعتبر $ق_س$ فى اللحظة المبينة بشكل (١٠–٤) فهى تحمل نفس النسبة إلى ق كنسبة س إلى ر

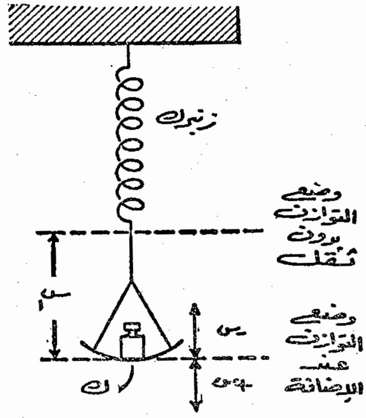
أى أن $$\frac{ق_س}{ق} = \frac{س}{ر}$$

أو $$ق_س = \frac{ق}{ر} س$$

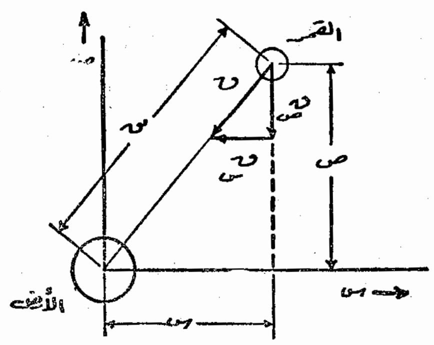
بما أن ق لا تتغير مع الزمن ، فإن $ق_س$ تتناسب مع الإزاحة س . كذلك فإن $ق_ص$ تتناسب مع الإزاحة ص . ولذا يمكن أن ننظر إلى الحركة الدورية كنتيجة لقوتين إحداهما تؤثر على طول س ، والأخرى تؤثر على طول ص ، وكل منهما تتغير مع الزمن وتتناسب مع الإزاحة المناظرة لها س (أو) ص ، وتشير إلى نقطة الأصل فى الإحداثيات ، أى الأرض ، وتضاف القوتان إحداهما إلى الأخرى لإعطاء قوة الجاذبية الكلية المتجهة إلى الأرض . ولا بأس من اعتبار حركة القمر كأنها ناشئة من مثل هاتين القوتين .

١٠ ــ ٢ قانون « هوك » :

إن إدخال قوتين متعامدتين فى موضوع كالذى درسناه لم يدخل أى تبسيط. ولكن إذا كانت إحدى القوتين المتجهتين إلى الداخل والمتناسبة مع الإزاحة موجودة وحدها ، فإن الإزاحة تتغير بالكيفية التى تتغير بها س فى المسألة السابقة ، وهى الممثلة بيانيًّا كما بشكل (١٠ ــ ٣) . . أى أن قوة واحدة من النوع المذكور (التى تتناسب قيمتها مع الإزاحة) تحدث حركة توافقية بسيطة على طول خط القوة ، وتتغير تغيراً موجباً مع الزمن .



(شكل ١٠ ــ ٥)



(شكل ١٠ ــ ٤)

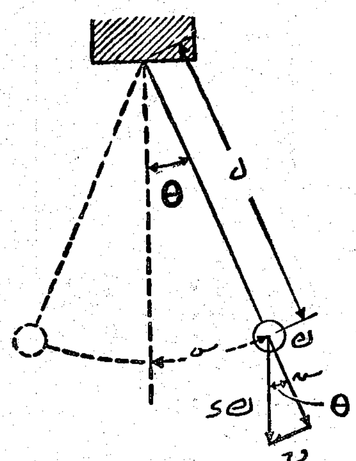
وقوى المرونة من هذا النوع الأخير . والمعروف أنها تخضع لقانون يسمى بقانون « هوك » ينص على أن القوى الناشئة من التعليقات المرنة (مثل اللولب ، وبعض الأجسام المطاطة ، وبعض أنواع التجاذب الكهربى والقوى الجزيئية) تكون متجهة إلى نقطة الاتصال وتتناسب مع الإزاحة (أو الاستطالة) من وضع السكون . وعندما يستخدم زمبرك كميزان شكل (١٠ ــ ٥) لتقدير الأوزان ، فإن الزمبرك يمتد بمقدار $س_{1}$ وهو امتداد يتناسب مع الثقل الموضوع على الكفة . وبما أن الثقل هو ك حـ والمجموعة فى حالة توازن ، فإن الزمبرك لابد أن يولد قوة إلى أعلى مقدارها ك حـ تتناسب مع س . ومن الواضح أن هذه القوة مماثلة لمركبة القوة فى الاتجاه س فى موضوع القمر ، أية قوة تتناسب مع الإزاحة . وإذا شدت الكفة

المثقلة إلى وضع جديد على بعد س من وضع التوازن الأول وتركت فإنها تتحرك إلى + س ثم إلى — س ثم إلى + س ثانية ، كما بشكل ١٠ — ٣ الذى يمثل شكلها البيانى تماماً مع اختلاف زمن الدورة . وإذا كانت ك الكلية الكتلة للكفة والثقل ، فإن زمن الدورة (وهو زمن الذبذبة الكاملة) يمكن حسابه من :

$$ن = ٢ ط \sqrt{\frac{ك}{ب}} \text{ ثانية}$$

حيث (ب) هو ما يسمى بثابت الزمبرك وهو القوة مقدرة بالداين اللازمة لاستطالة الزمبرك بمقدار ١ سم أو قوة المط للسنتيمتر ، وقيمة ب للزمبرك « القاسى » أكبر منها للزمبرك (اللين) ولذا يكون زمن الذبذبة فى الحالة الأولى صغيراً عند مقارنته بزمن الذبذبة فى الحالة الثانية .

وهناك أداة تعرض لنا منها الحركة التوافقية البسيطة بطريقة سهلة واضحة .. وهى البندول البسيط ، ويمكن أن نتصور البندول مكوناً من كتلة على شكل كرة صغيرة فى نهاية قضيب رفيع عديم الوزن (أو خيط) . ويعتبر المتغير فى هذه الحالة هى الزاوية θ بين البندول والخط الرأسى . نحلل قوة الجاذبية على كرة البندول إلى مركبة ش تتعادل مع الشد فى الخيط ، وأخرى ق فى اتجاه مسار الحركة شكل (١٠ — ٦) . وفى حالة الذبذبة بزوايا صغيرة تتناسب ق مع θ أى مع الإزاحة س . ويصبح زمن الدورة ن هو الزمن اللازم لذبذبة كاملة من اليمين إلى اليسار ثم إلى اليمين ثانية . وبما أن د ثابتة فى المكان الواحد ، ل ثابتة كذلك ، فإن زمن ذبذبة البندول ثابت ، ويمكن استخدامه كوسيلة لحفظ الزمن وقياسه . وبقياس كل من ن ، ل يمكن استخدامه لايجاد عجلة الجاذبية الأرضية د . ويمكن بحساب بسيط أن نبين أن

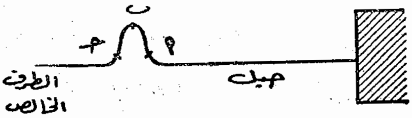


(شكل ١٠ — ٦)

$$ن = ٢ ط \sqrt{\frac{ل}{د}} \text{ ثانية}$$

١٠ ـــ ٣ الحركة الموجية :

يسمى انتقال الحركة الدورية أو التوافقية خلال وسط أو فضاء خال من المادة بالموجة . وهناك أنواع كثيرة من الموجات فى علم الفيزياء تختلف بنوع المؤثر الذى ينتقل ، ولكنها متماثلة من وجهات نظر كثيرة . وأحد أنواع الموجات الهامة ، هى التى نشاهدها فى تحرك المادة الملموسة مثل موجات الحبال والماء والموجات الصوتية . وهذه أسهل الموجات فى تصورها . وفى نوع آخر منها تنتقل القوى الكهربية المغنطيسية خلال المادة أو الفراغ . هذه



(شكل ١٠ – ٧)

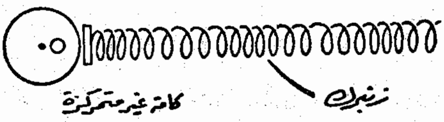
هى الموجات الكهربية المغنطيسية ، ومن أمثلتها موجات الضوء ، والموجات اللاسلكية . وهناك موجات أخرى تصاحب الدقائق المادية المتحركة السريعة وهى المسماة بموجات «دى برولى » وهى التى تعطى احتمال مشاهدة الدقيقة المتحركة فى موضع معين . وهذه أصعب الموجات فى تصورها .

وهناك علاقة وثيقة بين الموجات والحركات الدورية . فالواقع أن الموجات تشاهد عن طريق الحركات الدورية التى تحدثها فى جسيم . فموجة الماء تمر على سطح بحيرة ، فتسبب صعود قطعة من الفلين وهبوطها فى حركة دورية أو توافقية ، وهذا الاهتزاز الحادث الملموس هو الذى يقنعنا بوجود الموجة . وموجة اللاسلكى تصادف سلكاً هوائيـًّا ، فينشأ عنها بالتأثير حركات دورية فى الكترونات الهوائى ، وأسلاك الاتصال والصمامات فى جهاز الاستقبال . والنيوترون الذى طول موجته « الديبرولية » مناسب يحدث تأثيراً دوريـًّا فى نواة ذرة فيقسمها أو يمزقها إرباً . وقد يمر نيوترون آخر غير متجاوب فى « النغمة » مع النواة دون إحداث أى تأثير .

١٠ ـــ ٤ مفهوم الموجة :

إن طبيعة الموجة ذات دلالة بحتة ، بمقارنتها بالحركة الميكانيكية لجسيم ، لأن الموجة ليست « شيئاً » يمسك وإنما اضطراب ينتشر .

اعتبر ، على سبيل المثال ، حبلا مشدوداً ذا طرف حر ، وأن هذا الطرف يهتز فجأة إلى أعلى ، ثم إلى وضعه الأصلى ، شكل (١٠ — ٧) . فبدلا من أن يزاح الحبل بأكمله حول منحن أملس من نوع ما ، نجد أن هناك دفعة تنتقل على طول الحبل . فالجسيمات التى على مسافة من النهاية الخالصة لا تستقبل مباشرة معلومات عن الحركة التى حدثت إلا بعد زمن ما عند ما تصل إليها الدفعة . فنقطة مثل ا تتنبأ أولا بالجزء الابتدائى من الدفعة ، ونقطة مثل ب تدل على قمة الرحلة ، ونقطة مثل حـ تدل على نهاية الدفعة . الدفعة فى الواقع نوع من الموجة وهو اضطراب ينتقل على طول الحبل .

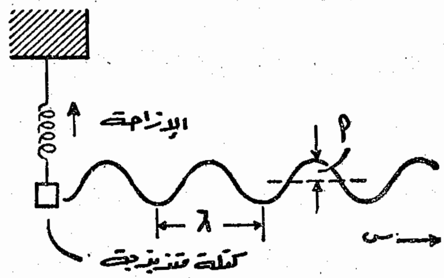


(شكل ١٠ — ٨)

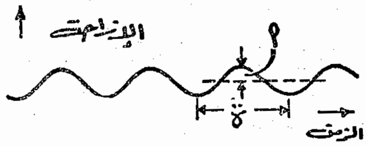
وينشأ موقف مماثل عند ما تزاح النهاية الحرة لزمبرك إلى الخارج ، ثم تترك لترجع إلى مكانها . إن دفعة تخلخل وتضاغط ترسل خلال الزمبرك شكل (١٠—٨).

إن مثل هذه الاضطرابات المفردة ، أو الدفعات ليست شائعة فى الطبيعة ، وإنما الشائع هو قطار مستمر من الموجات يصدر عن ذبذبة مستمرة . فإذا حركت نهاية الحبل المشدود باستمرار حركة توافقية بسيطة تنشأ موجات من المصدر يتبع بعضها بعضاً على طول الحبل ،وعند تحرك المصدر المتذبذب بحركة توافقية بسيطة ، فإن الموجة نفسها تكون من النوع الدورى البسيط . . أى أن كل جسيم من الحبل يتذبذب بحركة توافقية بسيطة مطابقة لحركة المصدر ، وهو طرف الحبل ، ولو أن الأجزاء المتحركة تنتظر دورها عند مرور الموجة خلال الحبل .

وإذا لم ننظر إلى الأجزاء المفردة من الحبل كما ذكرنا ، بل إلى الحبل كله فى لحظة واحدة لرأينا أن إزاحة الأجزاء المتذبذبة تختلف من نقطة إلى أخرى . ولنوضح هاتين الحقيقتين . إن شكل (١٠ — ٩) يبين تغير الإزاحة مع الزمن لجزء معين من أجزاء الحبل . وكما فى الحركات التوافقية البسيطة يعتبر ن زمن الذبذبة الكاملة أو مدتها . أما شكل (١٠ — ١٠) فيبين إزاحة الحبل فى لحظة واحدة معينة كدالة للمسافة على طول الحبل . وتسمى « الدورة فى المسافة » على طول الحبل شكل



(شكل ١٠ – ١٠)



(شكل ١٠ – ٩)

(١٠ – ١٠) بطول الموجة . وأقصى إزاحة وهى المرموز لها بالرمز ا فى الحالتين تسمى « السعة » . فالموجة ذات صفة دورية فى الزمان والمكان ، بمعنى أنه إذا أمكن « تجميد » الوسط (وهو الحبل هنا) للحظة قصيرة ، للاحظنا أن الاضطراب بطول الوسط له صفة دورية . وإذا ركزنا انتباهنا على دقيقة من دقائق الوسط ، للاحظنا أن حركة هذه الدقيقة دورية . هذه الدورية المزدوجة هى خاصة من خصائص الموجات سواء كانت فى حبل أو لولب ، أو كانت موجات صوتية أو كهربية أو موجات « دى برولى » الحديثة المصاحبة للدقائق الذرية المتحركة .

١٠ – ٥ سرعة الموجة :

بالرجوع إلى شكلى ١٠ – ٩ ، ١٠ – ١٠ معاً نجد أنه عند لحظة واحدة تكون المسافة بين نقطتين متتاليتين متماثلتين هى مسافة معينة تسمى بطول الموجة λ وحيث أنه فى زمن ن تكون النقطة المتحركة قد عملت ذبذبة كاملة ، وعلى وشك أن تبدأ الذبذبة التالية ، فإننا يمكن أن نعرف سرعة الموجة بأنها :

$$ع = \frac{\lambda}{ن}$$

إذ أن سرعة الاضطراب تقطع مسافة λ فى زمن ن . وهذه العلاقة تكتب غالباً هكذا :

$$ع = \lambda \, ت \quad \text{. . . . .} \quad (١٠ – ١)$$

حيث تسمى ت دائماً بتردد الموجة . ويعرف التردد بأنه عدد الذبذبات الحادثة فى الثانية . والواقع أن ت = ١ /ō . وتنطبق المعادلة (١٠ — ١) على جميع أنواع الحركة الموجية .

مثال١ : شوكة رنانة مهتزة ترددها ١٠٠ دورة /ث، تحدث موجة فى وتر . وبقياس طول الموجة الحادثة فى الوتر وجد أنه ١٢ سم . ما سرعة الموجة ؟

المعلومات : λ = ١٢ سم ، ت = ١٠٠ دورة /ث ، ع = ؟

الحل : ع = λ ت

= ١٢ × ١٠٠ = ١٢٠٠ سم/ ث (الجواب)

مثال٢ : محطة إذاعة ترسل إذا عتها على موجة ترددها ٧٥٠ كيلو سيكل / ث كما تبينها واجهة الجهاز المستقبل . والمعروف أن سرعة الموجات اللاسلكية ٣ × ١٠^١٠ سم/ث . ما طول موجة المحطة ؟

المعلومات : ت = ٧٥٠ × ١٠^٣ دورة / ث ، ع = ٣ × ١٠^١٠ سم / ث

λ = ؟

الحل : $\lambda = \frac{ع}{ت}$

$= \frac{٣ \times ١٠^{١٠}}{٧,٥ \times ١٠^{٥}} = ٤ \times ١٠^{٤}$ سم = ٤٠٠ متر (الجواب)

١٠ — ٦ أنواع الموجات :

ميزنا فى بند (١٠ — ٤) بين الدفعة الموجية والقطار الموجى أو الموجة . فى الأولى يحدث اضطراب مفرد قابل للانتقال ، وفى الثانية تنتقل سلسلة مستمرة من الاضطراب . ولقد فسرنا موضوع القطار الموجى على فرض أن مصدر الاضطراب يهتز بحركة توافقية بسيطة ، وهذا حقيقة . المهم أننا تمكنا بهذه الوسيلة من الوصول

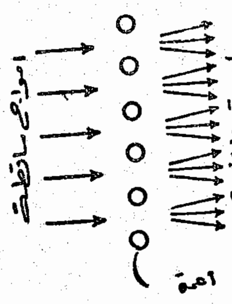
إلى تعاريف لبعض صفات الموجة مثل المدة والتردد وطول الموجة . ونود أن نلفت النظر الآن إلى تفصيل آخر ، فإن شكلى (١٠ — ٧) ، (١٠ — ٨) يبينان أن هناك وسيلتين يمكن أن تنتقل بهما الدفعة الموجية أو القطار الموجى . فى شكل (١٠ — ٧) وشكلى (١٠ — ٩ و ١٠ — ١٠) تكون حركة الوسط عمودية على اتجاه الانتشار . مثل هذه الموجة تسمى بالموجة العرضية . وفى شكل (١٠ — ٨) تكون حركة الوسط فى اتجاه انتشار الموجة . هذه الموجة تسمى بالموجة الطولية . ويمكن تصنيف جميع الموجات فى الكون ، بحيث تنضم إلى أحد هذين القسمين أو إليهما معاً . فموجات الماء ، والأوتار المهتزة ، والموجات الكهربية المغنطيسية (الضوء) هى أمثلة من الحركة الموجية العرضية . بينما موجات الضغط فى النافورات وموجات الهزة الفجائية (من المفرقعات) وموجات الصوت فى الجو طولية الصفة .

وطبيعة الموجات الكهربية المغنطيسية ذات أهمية خاصة فى دراسة الفيزياء الذرية ، ولذا سوف تكون مناقشتنا مقصورة على الحركة الموجية العرضية بصفة عامة والموجات الضوئية بصفة خاصة . فالآن وقد ضيقنا مجال البحث ، يلفت نظرنا مباشرة ويجابهنا السؤال الآتى : كيف نعرف أن الضوء موجة ؟ إن كشف الحركة الموجية سهل جدًّا فى حالة الحبل والماء ، حيث نرى الموجة منتشرة ونستطيع أن نقيس سرعتها وترددها بطريقة مباشرة . وموجات الصوت المنتشرة يمكن دراستها بوضع غطاء رقيق فى طريقها ، وملاحظة تردده بطريقة كهربية كما يحدث باستخدام الميكروفون ، وسرعة الموجات الصوتية بطيئة (حوالى ٣٤٠ م / ث) فيمكن حسابها باستخدام مسافة معينة وساعة إيقاف . أما موجات الضوء ، فلا يمكن كشفها بهذه الوسائل البسيطة ، فلا ترددها بسيط ولا سرعتها بطيئة ، بحيث يمكن استخدام وسائل ميكانيكية فى القياس . وموجات « دى برولى » أعسرها على الكشف ، وسوف نرى فيما بعد أنها من أنواع المدلولات التى لا يمكن استنتاجها إلا بوسائل غير مباشرة . وإذا كنا قد أعلنا أن الضوء حركة موجية ، وأن موجات « دى برولى » موجودة فعلا ، فلأن هناك شواهد وأدلة راجعة إلى خاصتين من أهم

خصائص الحركة الموجية ، وهما : الحيود والتداخل . وهاتان الظاهرتان مرتبطتان ارتباطاً وثيقاً ، حتى إننا سوف نعالجهما تحت بند واحد .

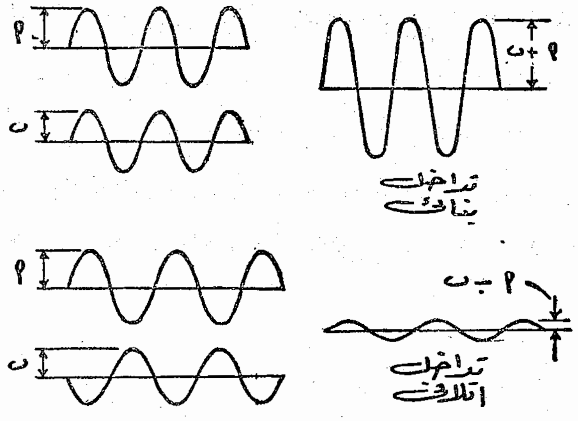
١٠ ــ ٧ حيود وتداخل الموجات الضوئية :

عند ما يسير الضوء فى وسط متجانس خال من العقبات ، فإنه يسير فى خطوط مستقيمة ، وهذه القضية صحيحة بالنسبة لجميع أنواع الموجات ، وبالتدقيق سوف نجد أن الوصف بكلمة « خال من العقبات » ذو أهمية خاصة . اعتبر ما يحدث عند ما تقترب موجات الماء من صف من العقبات ، مثل صف من الأعمدة فى الميناء شكل (١٠ ــ ١١) . إذا دققنا النظر نجد أن الموجات تظهر كأنها تنحنى حول الأعمدة ، وكلما كانت المسافة بين الأعمدة أقل ظهر هذا الانحناء بشكل أوضح . تحدث مثل هذه الظاهرة فى الموجات الصوتية . إذ أننا نستطيع سماع الصوت النافذ من شقوق الأبواب والنوافذ ، دون أن نكون فى خط مستقيم مباشر مع الأبواب والنوافذ . إن الصوت ينتشر جانبيًّا عند مروره من مثل هذه الفتحات ، ويسمى انحناء الموجة حول عائق بالحيود . ولا توجد صعوبة فى مشاهدة ظواهر الحيود فى موجات الماء والصوت ، ولكن إدراك الحيود فى حالة موجات الضوء يعتمد على ظاهرة التداخل .



(شكل ١٠ ــ ١١)

التداخل هو إضافة (موجبة أو سالبة) لموجتين (أو أكثر) من الموجات المتماثلة ، التى تعبر إحداهما مسار الأخرى فى الفضاء . والموجات تستطيع أن تساعد أو تعاكس إحداها الأخرى أى أنها تتداخل تداخلا بنائيًّا أو إتلافيًّا ، حسب الظروف ، وإذا كان على قطارين موجيين مستمرين أن يتداخلا ، فلا بد أن يكونا ذوى طول موجى واحد ، ولو أن القطارات الموجية المتقاربة جدًّا فى طول الموجة ، تستطيع أن تتداخل لحظيًّا أو دوريًّا . إن ظروف التداخل وشروطه بين



(شكل ١٠ — ١٢)

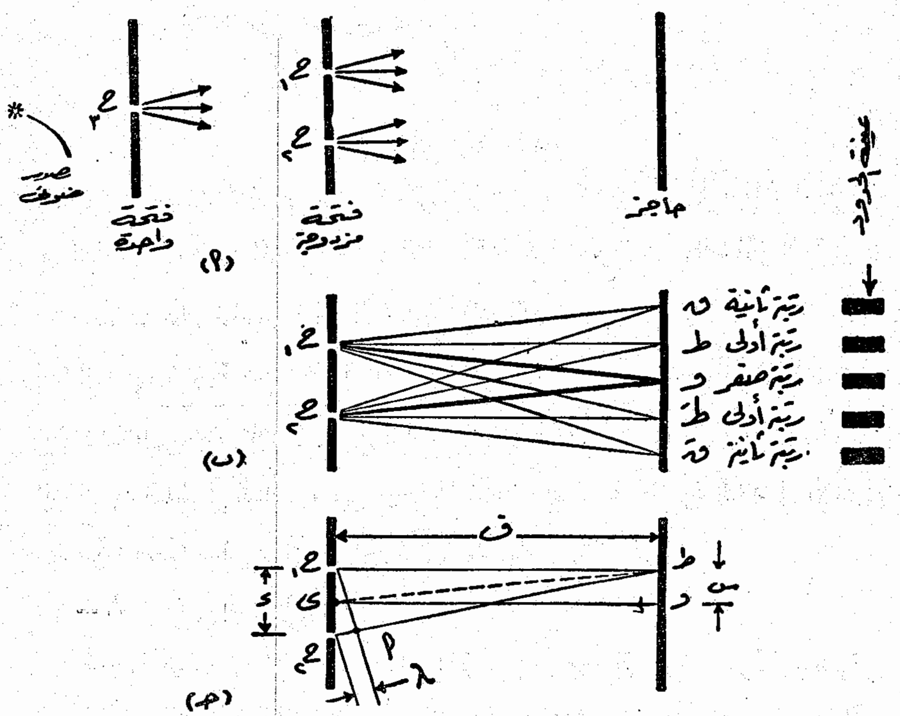
قطارين موجيين تتضح من شكل (١٠ — ١٢) . إذا كان للموجتين وسعاتهما ا، ب الطول الموجى نفسه وكانتا متفقتين فى الخطوة (بمعنى انطباق القمة والقاع فى إحداهما على نظيرتيهما فى الأخرى) فإن التداخل يكون بنائيًّا . وإذا كانت إحداهما ب خارجة عن الخطوة بمقدار نصف طول الموجة بالنسبة إلى الأخرى ا ، فإن التداخل يكون إتلافيًّا . ومن الواضح أنه إذا كانت السعتان ا ، ب متساويتين فإن نتيجة التداخل البنائى ، هى موجة لها ضعف السعة ، ونتيجة التداخل الإتلافى هى موجة سعتها صفر ، أى انعدام الموجة الناتجة على الإطلاق .

١٠ — ٨ تجربة « يونج » المزدوجة الفتحة :

لنبين كيف تكشف ظاهرة التداخل عن حيود الضوء ، سوف نستعرض تجربة يونج التاريخية الرائدة التى أجريت عام ١٧٩٠ . إن هذه التجربة هى التى أنهت بطريقة عرضية نقاشاً حامياً يتعلق بطبيعة الضوء استمر ردحاً من الزمن . والأجزاء الأساسية فى تجربة « يونج » موضحة بشكل (١٠ — ١٣) ا . فإن الضوء النافذ من فتحة $ع_٣$ يقع على فتحتين متجاورتين ضيقتين $ع_١$ ، $ع_٢$* واتساع الفتحات ومسافة انفصالها مبالغ فيه (بشكل ١٠ — ١٣) ، ومن المناسب أخذ اتساع مناسب لكل من الفتحتين قدره ١,٠ مم أو ٢,٠ مم بمسافة انفصال

* استخدم « يونج » ثقبى دبوس . والتجربة المذكورة مشابهة لها تماماً ، ولكن من الأسهل وصفها باعتبار فتحتين ضيقتين بدل الثقبين .

تتراوح بين ٠,٤ مم، ٠,٥ مم) . والضوء النافذ من ح$_1$ ، ح$_2$ يحيد، وبذلك يصبح الشعاعان ح$_1$و ، ح$_2$و (شكل ١٠ — ١٣ب) من الأشعة الممكنة، حيث (و) نقطة من الحاجز أمام منتصف مسافة الانفصال بين الفتحتين . ولكن المسارين ح$_1$و ، ح$_2$و متساويان تماماً فى الطول ، ولذا فإن الشعاعين المتجهين إلى الحاجز يصلان إلى (و) فى نفس الخطوة (أو الطور) فيحدثان عنده تداخلا بنائياً .



(شكل ١٠ — ١٣)

لذا لابد أن يكون هناك ضوء عند (و) . وإذا راعينا نقطة مثل ط على الحاجز على بعد س من و (شكل ١٠ — ١٣ ج) ، فإن الشعاع الواصل إليها ح$_1$ ط يقطع مسافة ف ، بينما الشعاع الآخر ح$_2$ ط يقطع مسافة أكبر من ف بمقدار ح$_2$ ا . وإذا كانت الزيادة فى المسافة (ح$_2$ ا) مساوية طول موجة واحدة تماماً ، فإن الشعاع ح$_2$ ط يكون متأخراً فى الخطوة بمقدار طول موجى واحد عن ح$_1$ ط ، مما يجعله يتفق معه فى الخطوة (أو الطور) فعلا ، والنتيجة أنه يحدث

تداخل بنائى (ضوء) أيضاً عند ط . وأخيراً من الممكن إيجاد نقطة أخرى ى على الحاجز ، حيث فرق المسار يساوى ضعف الطول الموجى (λ٢) وأخرى بعدها يكون فرق المسار عندها (λ٣) وهكذا . وبما أن الحيود هو ظاهرة تماثل (على الجانبين) ، فإن هناك سلسلة أخرى من الصور المضيئة على الحاجز تحت (و) وإحدى هذه النقط هى طَ حيث $ع_١$ طَ هو المسار الأكبر . كذلك ىَ .

ونستخلص من التحليل مايأتى : يحدث حيود عند الفتحتين $ع_١$، $ع_٢$ ، فيكون من نتيجة ذلك حدوث مناطق حيود تقع بتماثل على الحاجز ناشئة من التداخل البنائى لأشعة حائدة معينة ، مفصولة بمناطق أقل استضاءة ناشئة من التداخل الإتلافى لأشعة أخرى حائدة (وتكون هذه المناطق على شكل شرائط مستطيلة — أو هدب — حيث إننا نستخدم فتحات بدلا من الثقوب ليحيد عندها الضوء) . هذه هى هدب الضوء والظلام التى نراها على الحاجز . وتسمى الهدبة المركزية وهى مضيئة دائماً بالهدبة ذات الرتبة صفر . وتسمى أول الهدب المضيئة على كل من جانبى المركزية بهدبة الرتبة الأولى ، وتسمى ثانيتهما على كل من الجانبين بهدبة الرتبة الثانية وهكذا . والأهم من هذا أنه يمكن من تجربة « يونج » قياس طول موجة الضوء المستخدم . وبمراعاة شكل (١٠ — ١٣ جـ) : المثلث $ع_١$ ا $ع_٢$ يشابه المثلث ى ط و . (تذكر أن مسافة الانفصال $ع_١$ $ع_٢$ مبالغ فيها جداً فى الرسم)

إذن ، $$\frac{ع_٢ ا}{ع_١ ع_٢} = \frac{و ط}{ى و}$$

ولكن ع ا يساوى λ أو ٢ λ أو ٣ λ . . . ، إذا كانت ط منطقة مضيئة . ونستطيع التعبير عن هذا جبرياً بوضع $ع_٢$ ا = ى λ ، حيث ى = ١، ٢، ٣، ... وتسمى ى برقم الرتبة . وسوف نضع $ع_١$ $ع_٢$ = ء وهى مسافة انفصال الفتحتين ، ى و = ف وهو البعد بين الفتحتين والحاجز ، و ط = س ، وهو بعد هدبة التداخل المضيئة عن مركز الهدب . بهذه الرموز تأخذ العلاقات المثلثية السابقة الصيغة .

$$\frac{ى \lambda}{ء} = \frac{س}{ف}$$

أو $$\text{ه}\,\lambda = \frac{\text{ى} \times \text{س}}{\text{ف}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (١٠-٢)$$

وحيث إن ى ، س ، ف من السهل قياسها ، ه نتيجة عد فقط ، فإنه يمكن حساب λ .

مثال : لوحظ أن صورة الرتبة الثانية — الحادثة بوساطة فتحتين مسافة انفصالهما ٠,٥ مم — تكون على بعد ٢ مم من الرتبة صفر . فإذا كان الحاجز على بعد ١ م من الفتحتين ، فما طول موجة الضوء ؟

هنا ه = ٢ ، ى = ٠,٥ مم = ٠,٠٥ سم ، س = ٢ مم = ٠,٢ سم ، ف = ١٠٠ سم

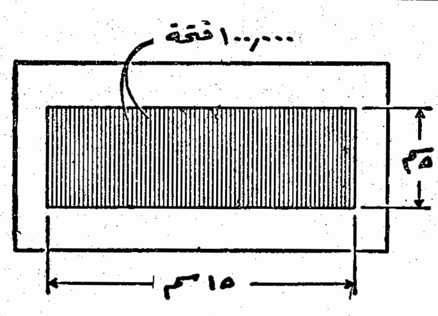
إذن $$\text{ه}\,\lambda = \frac{\text{ى} \times \text{س}}{\text{ف}}$$

$$٢\,\lambda = \frac{٠,٠٥ \times ٠,٢}{١٠٠}$$

$$\text{ه} = ٥ \times ١٠^{-٥} \text{ سم (الجواب)}$$

١٠ — ٩ محزوز الحيود :

من المثال السابق ، نجد أن عينة الحيود المشاهدة على الحاجز باستخدام فتحتين تمتد إلى مسافة قليلة (س = ٢ مم فقط لصورة الرتبة الثانية) . وهناك وسيلة تزيد فى مقدار الانتشار ، وتجعل من الممكن عمل قياسات أدق ، علاوة على فائدتهما لأغراض أخرى، تسمى بمحزوز الحيود . وهى عبارة عن آلاف الفتحات الضيقة المتجاورة بدلا من فتحتين كما فى تجربة « يونج » . والمحزوز الجيد يحتوى على مايقرب من ١٠٠،٠٠٠ فتحة على طول ١,٥ سم بارتفاع ٥ سم (شكل ١٠—١٤) . وسمى هذا الجهاز بالمحزوز لأنه من الممكن عمله بحفر حزوز



(شكل ١٠ — ١٤)

دقيقة متجاورةعلى لوح من الزجاج باستخدام سن حفر ماسية دقيقة مهيأة على على جهاز خاص . والمسافة بين حزين متتاليين هى التى تقابل الفتحة فى تجربة يونج ، وتسمى المسافة من منتصف حز إلى منتصف الحز الذى يليه بعنصر المحزوز ويرمز لها بالرمز ء . وبدون تحليل الخواص الحيودية أو التداخلية للمحزوز يكفى أن نذكر أن المعادلة (١٠–٢) تنطبق عليه أيضاً *،ومنها نلاحظ أنه لرتبة معينة كلما كانت ء صغيرة زادت س ، أى انتشر الضوء على الحاجز إلى مسافات أبعد . ولابد من استخدام عدسة بعد المحزوز لتركيز الضوء من فتحاته الضيقة جداً على الحاجز . ويمكن الحصول على المسافة ء من صانع المحزوز بالسؤال عن عدد الحزوز للسنتيمتر أو بقياس المسافة بين الحزوز مباشرة باستخدام ميكروسكوب متحرك .

مثال : ضوء طول موجته λ = ٥ × ١٠$^{-٥}$ سم يحاد بوساطة محزوز يحتوى على ٢٠٠٠ حز للسنتيمتر . إذا كان الحاجز على بعد ثلاثة أمتار من المحزوز ، أين تنشأ صورة الرتبة الأولى ؟

$$\text{ن}\,\lambda = \frac{\text{ء} \times \text{س}}{\text{ف}}$$

$$١ \times ٥ \times ١٠^{-٥} = \frac{١}{٢٠٠٠} \times \frac{\text{س}}{٣٠٠}$$

س = ٣٠ سم من الرتبة رقم صفر (الجواب)

ويجب ملاحظة أنه بالنسبة لمحزوزمعين فى جهاز مهيأ للعمل تكون ء ، ف ثابتة ، فنجد أنه بالنسبة للرتبة الواحدة ، تتناسب س طردياً مع λ . وهذا معناه أن الأطوال الموجية المختلفة فى الضوء الساقط تشغل نقطاً مختلفة على الحاجز ، أىأن الضوء يحيد بمقادير تعتمد على الأطوال الموجية المختلفة ، وبعبارة أخرى أنه يفرق الضوء فيحدث طيفاً مبيناً به الأطوال الموجية التى يحتويها . وهذا الطيف مكرر فى كل رتبة ما عدا الرتبة صفر ، لعدم وجود حيود « حقيقى » أى إزاحة عندها .

---

* المعادلة (١٠ – ٢) تقريبية تعتمد على أن س صغيرة بالنسبة إلى ف والتعبير المضبوط هو ن λ = ء حا Θ حيث Θ زاوية الحيود مقيسة من المركزية .

١٠ ــ ١٠ أهمية الحيود والتداخل :

تجشمنا جهوداً طويلة لنبين أن الضوء يعانى حيوداً وتداخلا . ولا نعرف ظاهرة تدل على حدوثهما للجسيمات أو الدقائق ، لذا نحن نعتبر حدوث هاتين الظاهرتين فى الضوء دليلاً على موجيته . وهذا الإجراء يأخذ سنداً إضافيًّا من موجات الماء التى نحس بها بطريقة مباشرة ، وموجات الصوت التى ندركها بطريقة غير مباشرة ، وكل منهما قابل للحيود والتداخل ، لذا فإن الاستطراد المنطقى يقضى بأن كل ما يمكن إخضاعه للحيود والتداخل يعتبر ذا طبيعة موجية ، إن صفات الموجة فقط ، هى التى تؤهلها لإمكان حدوث هاتين الظاهرتين فيها . وطريقة الكشف عن الصفة الموجية بهذه الطريقة ذات أهمية خاصة ، وسوف نرى لها تطبيقات كثيرة أثناء دراستنا للظواهر الذرية والنووية .

تمارين

١ ــ ما زمن ذبذبة بندول طوله ١ م ؟

الجواب : ٢,٠ /ث

٢ ــ بندول معين طوله ٧٠ سم وجد أن زمن ذبذبته ١,٦٨ ث . ما هى عجلة الجاذبية فى المنطقة التى يشتغل فيها البندول ؟

الجواب : ٩٧٨ سم /ث^{٢}

٣ ــ متذبذب ميكانيكى متصل بأحد طرفى خيط مشدود يعمل ٥٠ ذبذبة /ث . فإذا وجد أن طول الموجة الحادثة فى الخيط ١٢٥ سم فما سرعة الموجة فى الخيط ؟

الجواب : ٦٢٥٠ سم /ث

٤ ــ موجات اللاسلكى تسير بسرعة ٣ × ١٠^{١٠}سم/ ث . ما طول موجتها إذا كان ترددها ١ ميجا سيكل /ث ؟

الجواب : ٣٠٠ م

٥ ــ مثل موجات اللاسلكى فإن سرعة الضوء ٣ × ١٠^١٠ سم/ث . ما هو تردد الضوء الذى طول موجته ٦ × ١٠^-٥ سم ؟

الجواب : ٥ × ١٠^١٤ ذبذبة/ث

٦ ــ فى تهيئة إحدى تجارب « يونج » كانت الفتحتان على بعد ٠,١ مم إحداهما من الأخرى ، وتبعدان عن الحاجز مسافة ١٠ م . . إذا استخدم الضوء الأصفر (λ = ٦ × ١٠^-٥ سم) فما هى مسافة الانفصال على الحاجز بين الهدبة المركزية وكل من صورتى الرتبة الأولى على الجانبين ؟

الجواب : ٦ سم

٧ ــ محزوز حيود يحتوى على ١٠٠٠ حز للسنتيمتر يحدث صورة الرتبة الأولى على بعد ٢٥ سم من الصورة المركزية . فإذا كان الحاجز على بعد ٥ م من المحزوز فما طول موجة الضوء ؟

الجواب : ٥ × ١٠^-٥ سم

مراجع مقترحة للاطلاع

Dampier, Sir William, "A History of Science", New York, The Macmillan Co., 1946.

تحوى الصفحات من ٢٣٨ إلى ٢٤٢ عرضاً تاريخيًّا للنظرية الموجية للضوء .

Magie, W. F., "Source Book in Physics", New York Mc Graw-Hill Book Co., 1935.

ورد بالصفحة ٣٠٨ مقتطف من بحث يونج الأصلى عن تداخل الضوء (١٨٠٧) وورد بالصفحة ٣٦٥ جزء من وصف رولاند لطريقة عمل محزوز الحيود واستخدامه (١٨٨٢) .

Michelson, A. A., "Light Waves and Their Uses", Chicago, University of Chicago Press, 1903.

المحاضرتان ١ ، ٤ عن الحركة الموجية والتداخل كتبتا بطريقة واضحة .

الجزء الثاني

إلكترو ديناميكا الجسيمات

الفصل الحادى عشر

الشحنة الكهربية

١١ ـ ١ كنه الشحنة الكهربية :

إلى هنا كانت معظم دراستنا السابقة منحصرة فى ديناميكا الجسيمات وتطبيقاتها . وقد رأينا أنها تصف الكثير من ظواهر العالم المحسوس ، بل إنها تصف حتى الحرارة التى هى مظهر لديناميكا الجزيئات غير المرئية . ومع ذلك فحتى بالنسبة لفيزيائى القرن التاسع عشر ، وهو الذى كان يعتبر العالم كنظام ديناميكى ضخم ، كانت هناك مجموعة أخرى من الظواهر والنظريات لها من الأهمية فى الطبيعة مثل ماللخواص الديناميكية للمادة . أما هذه الظواهر والنظريات فهى التفاعلات الكهربية المتبادلة بين الجسيمات .

وتتوقف الظواهر الكهربية كافة على خاصية أساسية لجسيمات المادة تسمى بالشحنة الكهربية . وهى ، كالكتلة ، من حيث الأهمية فى الطبيعة بحيث لا يتأتى تعريفها تعريفاً دقيقاً بدلالة الآراء الابتدائية ، ولا يمكن تفهمها إلا فى ضوء الظواهر التى ترتبط بها ، على أنه ، بخلاف الحال فى الكتلة ، يوجد فى الطبيعة نوعان من الشحنة . كما أنه توجد بالإضافة إلى ذلك ، جسيمات أساسية لا تحمل شحنة على الإطلاق . أما هذان النوعان من الشحنة فلهما وجهان متضادان (كالأعداد الموجبة والأعداد السالبة) ويمكنهما الاتحاد بحيث يعادل أحدهما الآخر ويكونان جسيمات مركبة عديمة الشحنة . ونعرف على الأقل حالة واحدة تتحد فيها الشحنتان وتلاشى كل منهما الأخرى ــ فتزول الشحنة وتزول الكتلة وتزول الجسيمات ، تزول كلها تماماً . والشحنة الكهربية كالطاقة لا تفنى فى العمليات الفيزيائية . ومع أن الشحنة يمكن معادلتها بشحنة أخرى ، غير أنه لا يمكن بتاتاً خلق شحنة مفردة بأية عملية معروفة .

وتعتبر الكهربا عادة بالنسبة لعامة الناس كما لو كانت لغزاً مستغلقاً . فالمادة يمكن أن ترى وأن تلمس ، وهذه الحقيقة تسدل علينا إحساساً خادعاً بالإدراك ،

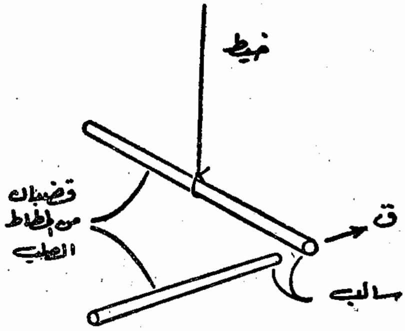
لا يمكننا تطبيقه على الظواهر الكهربية . ولعل هذا من حسن الحظ . إذ أنه يتيح لنا معالجة الموضوع دون التقيد بعقائد باطلة .

ويهدف علم الكهربا فى النهاية إلى صياغة نوع من الديناميكا يتضمن كافة القوانين المعتادة للقوة والكتلة والحركة مضافاً إليها تفاعلات الجسيمات المترتبة على خصائصها الكهربية . وخلاصة هذه الصياغة تسمى بالالكترو ديناميكا. وهو علم معقد نوعاً ، إذ تندمج فيه عدة آراء جديدة مع مجموعة من القوانين الأساسية الصعبة إلى حد مّا . وقد استغرقت معالجته نحو مائة عام من الجهود المتصلة قبل وضعه فى صيغته النهائية المنظمة على يدى « مكسويل » فى غضون ١٨٧٠ . وتعرف الآن نظرية «مكسويل» بالألكترو ديناميكا الكلاسيكية ، تمييزاً لها من الكترو ديناميكا الكم الحديثة ، التى بزغت من الظواهر الكهربية التى تحدث فى النطاق الذرى ، حيث تتطلب السرعة الكبيرة والجسيمات الدقيقة استخدام النظرية الذرية والنظرية النسبية معاً .

وأبسط الظواهر الكهربية تتعلق بالشحنات الساكنة ، أى الكهربا الاستاتيكية أو الألكترو ستاتيكا . ويمكن وصف التفاعل بين الشحنات الكهربية بقانون بسيط ، وتفسر الظواهر بسهولة على أساس كنه هذه القوة . وقد كانت الكهربا الاستاتيكية أول موضوع من موضوعات الألكترو ديناميكا تم بحثه وفهمه .

١١ – ٢ الكهربا الاستاتيكية الاحتكاكية :

يمكننا من تجارب غاية فى البساطة أن نتفهم شئون الكهربا بدرجة كبيرة من العمق والدقة . وأولى هذه التجارب هى : إدلك أحد طرفى قضيب من المطاط الصلد بقطعة من الصوف أو الفراء ، ثم علق القضيب بخيط دقيق (شكل ١١–١). فإذا دلك قضيب آخر من المطاط الصلد بالكيفية نفسها ثم قرب من القضيب الأول تنشأ قوة تنافر وينطرد القضيب المعلق . وقد اكتشف قدماء الإغريق هذه الظاهرة باستخدام حبات من الكهرمان



(شكل ١١ – ١)

(الكهربا) بدلا من المطاط الصلد . ومما يذكر أن اللفظ اليونانى للكهرمان هو إلكترا (Electra) ، ومنه اشتق الاصطلاح الدولى « إلكتريستى *» (Electricity) للدلالة على العلم الذى يبحث هذه الظاهرة .

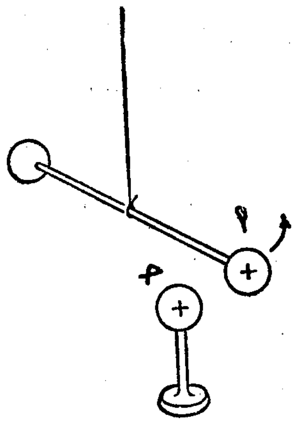
وإذا أعيدت التجربة باستعمال الحرير لدلك قضبان من الزجاج بدلا من قضبان المطاط الصلب ، فالنتيجة واحدة ، وهى وجود قوة تنافر . غير أن الأمر يختلف إذا كان أحد القضيبين من المطاط المدلوك بالفراء والآخر من الزجاج المدلوك بالحرير ، فهنا تنشأ ظاهرة جديدة ، إذ تظهر قوة تجاذب بين القضيبين . وكل تجربة من هذه التجارب الثلاث يمكن تكرارها فى الفراغ ، ولو أن الأمر لا يخلو من بعض الصعوبات الفنية ، ولكن النتائج هى بذاتها . وعلى ذلك هناك نوع جديد من القوة . وهو لا يحتاج إلى وسط مادى ، شأنه فى ذلك شأن قوة الجاذبية النيوتنية ، ولكنه يفترق عنها من حيث إنه إما أن يكون تجاذباً وإما تنافراً ، فى حين أن الجاذبية النيوتنية هى دائماً قوة تجاذب . ويسمى ذلك النوع الذى نحن بصدده بالقوة الالكتروستاتيكية ، أو قوة كولوم .

والخاصية التى يكتسبها قضيب المطاط المدلوك بالفراء وقضيب الزجاج المدلوك بالحرير تسمى بالشحنة الكهربية . وواضح أنه يوجد لدينا نوعان من الشحنة ، فالمطاط يؤثر على المطاط تأثيراً مغايراً لتأثيره على الزجاج . وقد تخيرنا أن نسمى الشحنة التى يحملها قضيب الزجاج شحنة موجبة ، والشحنة التى يحملها قضيب المطاط شحنة سالبة . (تعود هذه التسمية إلى بنيامين فرانكلين) . ويمكننا إعادة التعبير عن نتائج الاختبارات الثلاثة الأساسية على النحو التالى : الشحنة السالبة تتنافر مع الشحنة السالبة ، والشحنة الموجبة تتنافر مع الشحنة الموجبة ، ولكن الشحنة الموجبة تتجاذب مع الشحنة السالبة . ونستطيع أن نختصر مدلول ذلك بالعبارة : الشحنات المتماثلة النوع تتنافر ، والشحنات المتضادة تتجاذب .

* جرى العرف فى المراجع العربية على إطلاق كلمة كهربا فى هذا المعنى للدلالة على العلم الذى نشأ عن الخاصية التى عرفت فى أول الأمر فى مادة الزينة الراتنجية الصفراء التى درجنا على تسميتها الكهرمان ، ولو أن صوابها الكهربا . (المترجمون)

١١ — ٣ قانون كولوم للقوة الألكتروستاتيكية :

إن النتيجة الحتمية التى يؤدى إليها اكتشاف نوع جديد من القوى فى الطبيعة هى السعى إلى سن قانون كمى لهذه القوة . وهذا ما فعله فى الوقت نفسه تقريباً كل من « كولوم » و« كافندش » باستخدام جهاز ينبنى على مبدأ مماثل للمبدأ الذى سبق أن طبقه « كافندش » فى تعيين قانون قوة الجاذبية (بند ٥ — ٧) . ويتألف الجهاز من كرتين خفيفتين جداً (عادة من كرات نخاع البيلسان المغطاة بقشرة رقيقة من الذهب أو الفضة) مثبتتين فى نهاية ذراع أفقى معلق بسلك رفيع (شكل ١١ — ٢) . وتقرب كرة ثالثة محمولة على حامل ثقيل من إحدى الكرتين المعلقتين. وتحمل الكرتان ا ، حـ بشحنتين متماثلتى الإشارة ، ويرصد مقدار الالتواء الحادث فى الخيط بفعل التنافر الألكتروستاتيكى . ومن تجربة معايرة منفصلة يمكن التعبير عن زاوية الالتواء هذه بوحدات قوة أى بالداين ، تماماً كما فعلنا فى تجربة « كافندش » . وقد كانت النتائج مشابهة بشكل واضح لقانون الجاذبية النيوتنية الذى حققه « كافندش » عمليا .



(شكل ١١ — ٢)

وقد وجد « كولوم » أن قوة التنافر تتوقف على مقدار الشحنة التى تحملها الكرة ا ، وعلى مقدار الشحنة التى تحملها الكرة حـ ، وعلى مربع المسافة الفاصلة بين مركزيهما . فإذا كانت $س_1$ شحنة الكرة ا ، $س_2$ شحنة الكرة حـ ، ر المسافة المسافة الفاصلة ، فإن القوة :

$$ق \propto \frac{س_1 \, س_2}{ر^2}$$

(لاحظ التشابه مع قانون نيوتن فى الجاذبية وهو : $ق \propto \frac{ك_1 \, ك_2}{ر^2}$) .

ويكتب ثابت التناسب عادة بالصورة $\frac{1}{\epsilon}$ ، « إبسيلون » . وعليه فإن

$$ق = \frac{1}{\epsilon} \frac{س س^-}{ر^٢}$$

وقانون الجاذبية النيوتنية وقانون الألكتروستاتيكية كلاهما قانون « تربيع عكسى » وكل منهما يتعلق بخصائص أساسية للمادة ، كما أن كلا منهما يمكن أن يسرى مفعوله خلال الفضاء . ولعله ليس من الصدفة أن تتشابه نواميس القوى للخواص الجوهرية للجسيمات ، ولو أن مدلول هذه الحقيقة لم يعرف بعد تماماً .

١١ ــ ٤ وحدة الشحنة الألكتروستاتيكية :

إلى هنا لم يذكر شيء عن الوحدة التى تقاس بها الشحنة . وقد أمدنا قانون « كولوم » بالوسيلة التى نعرف بها الوحدة . فبما أن وحدات كل من س ، ϵ لم تحدد ، فيمكننا أن نتخير ϵ = ١ للفراغ ونجعلها كمية بدون أبعاد ، أى مجرد عدد صرف لا تمييز له ، وبذا نعرف وحدة الشحنة بوضع س = س^- ، ر = ١ سم ق = ١ داين . وليس لهذه الوحدة اسم مفرد خاص بها ، وإنما يشار إليها بالوحدة الألكتروستاتيكية فقط (و. أ. س) للشحنة . وتعريفها اللفظى هو : الوحدة الألكتروستاتيكية للشحنة هى تلك الشحنة التى إذا وضعت فى الفراغ على بعد سنتيمتر واحد من شحنة مماثلة تماما ، تؤثر عليها بقوة تنافر مقدارها داين واحد .

وقد بينت التجارب أنه فى حالة الهواء تحت الضغط والحرارة العياريين ، ϵ = ١,٠٠٠٦ ، وعليه يمكن إلى درجة جيدة جداً من التقريب أن نعتبر ϵ = ١ وحينئذ ، فإن :

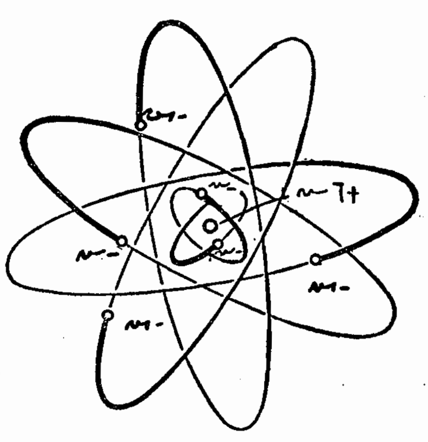
$$ق = \frac{س س^-}{ر^٢} \quad \text{للهواء أو الفراغ}$$

١١ ــ ٥ ميكانية الشحنة الاحتكاكية :

إن تفسير الكيفية التى يكتسب بها قضيب معزول شحنة كهربية عند دلكه

مسألة تجابهها معضلة تاريخية سبق أن واجهتنا فى هذا الكتاب ، وهى : أن التعليل السليم قد ظهر عند نشوء النظرية الذرية الحديثة التى جاءت متأخرة كثيراً عن دراسة الظواهر الألكتروستاتيكية . ولكن لامندوحة من أن نعكس التسلسل المنطقى والتاريخى لهذه الاكتشافات ، إذا أردنا أن نتفهم الظواهر الكهربية تفهماً صادقاً كلما قابلتنا .

تتألف كل المواد من مجموعة من الجزيئات ، وهذه بدورها إن هى إلا تجمعات من الذرات . والذرة نفسها نظام مركب يحتوى على قلب مركزى أو نواة تتركز فيها معظم كتلة الذرة وهى ذات شحنة موجبة . ويحيط بالنواة عدد من الجسيمات المتناهية الخفة تسمى بالألكترونات ، كل منها يحمل الشحنة السالبة نفسها . وقد قيست هذه الشحنة ووجد أنها تبلغ — ٤,٨ × ١٠$^{-١٠}$ وحدة إلكتروستاتيكية . والذرة ، كما توجد عادة فى الطبيعة ، فيها عدد من الالكترونات تكفى جملة شحناتها تماماً لموازنة الشحنة الموجبة على النواة (شكل ١١ — ٣) ، وبذا تبقى الذرة فى مجموعها متعادلة كهربيا . بيد أنه يمكن بوسائل مختلفة الإخلال بهذا الاتزان . فبنقل بعض الألكترونات من الذرة ، تصبح الغلبة فيها للشحنة الموجبة ، كما أنه يمكن فى ظروف أخرى ، إضافة بعض الألكترونات إلى الذرة فتكتسب شحنة سالبة . وتسمى الذرة غير المتزنة كهربيًّا بالأيون ، وتسمى عملية الإخلال بالتوازن الكهربى بالتأين . ومتى فقدت الذرة إلكترونات أصبحت أيونا موجباً . ومتى اكتسبت إلكترونات إضافية أصبحت أيوناً سالباً .



(شكل ١١ — ٣)

ومع أن الذرات توجد عادة متعادلة ، فثمة عمليات تتأين فيها إما تأيناً موجباً وإما تأيناً سالباً . وهناك ذرات كثيرة يسهل فيها إجراء هذا الإخلال بالتوازن الكهربى.

أما إشارة الأيون فتتوقف على طبيعة الذرة ذاتها ، وعلى طبيعة الذرات المحيطة بها ، وعلى العملية المؤينة . ومتى تحددت المادة وطريقة التأين . فكل نوع من الذرات ، وبالتالى كل عنصر ، يسلك سلوكاً متناسقاً لا يشذ عنه . وينطبق هذا القول بنصه على الجزيئات ، التى ليست سوى مجموعات مستقرة من الذرات . وعند ما تقترب الجزيئات التى يتألف منها قضيب المطاط الصلد حتى تلامس فعلا الجزيئات التى تتكون منها قطعة الفراء يلتقط جزىء المطاط بسهولة ألكترونات من جزىء الفراء . فإذا تعرض مسطح كبير من الفراء للاحتكاك مع مسطح كبير من المطاط يزداد انتقال الألكترونات عدة بلايين من المرات ، ولهذا فعند انفصال الفراء عن المطاط ، يتبقى على المطاط هذا الفائض من الألكترونات ، فنلاحظ أن القضيب يحمل شحنة سالبة . وإذا فحصنا الفراء بالكيفية نفسها نجد أنه قد اكتسب شحنة موجبة نتيجة لنقص الألكترونات فيه . وإلى جانب هذا ، فالشحنة السالبة التى يحملها المطاط تساوى — عددياً — الشحنة الموجبة التى يحملها الفراء . فالشحنة إذن لم تخلق خلقاً ، ولكنها انتقلت فقط . ويعلل تكهرب الزجاج المدلوك بالحرير تعليلا مماثلا ، فالزجاج يميل إلى فقد ألكترونات عند احتكاكه بالحرير ، ولذا يصبح الزجاج مشحوناً بشحنة موجبة ، فى حين يكتسب الحرير شحنة سالبة . وليس الغرض من الاحتكاك إلا تقريب المادتين حتى يتلاصق أكبر عدد من الجزيئات تلاصقاً وثيقاً . ويلاحظ أننا حرصنا على تعليل الأمر على أساس انتقال الألكترونات وحدها ، وذلك لأنه فى عمليات الشحن بالاحتكاك يتعذر تحرك الأيونات بسبب ثقلها الكبير نسبياً. ولو أتيح لها أن تتحرك لترتب على ذلك انتقال جزء محسوس من المادة من أحد الجسمين إلى الآخر . والواقع أن قوى الاحتكاك من الضعف بحيث تعجز عن ذلك . نستخلص مما تقدم أن الجسم المشحون بشحنة موجبة فيه عجز فى الألكترونات ، والجسم المشحون بشحنة سالبة يحتوى على زيادة فى الألكترونات ، وأن الألكترنات هى وحدها التى تنتقل أثناء الشحن بالاحتكاك وقد يحدث انتقال الأيونات الموجبة أو الأيونات السالبة فى عمليات كهربية أخرى. وخاصة فى السوائل والغازات ، كما يحدث فى فصيلة خاصة محدودة من الجوامد .

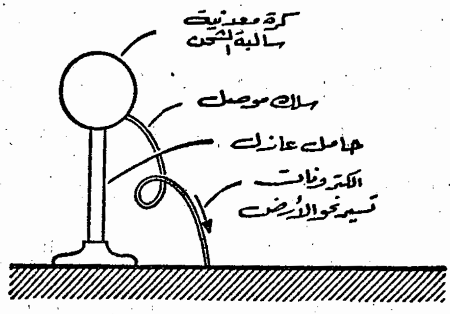
وقد نتساءل عما يحدث عند دلك الزجاج بالفراء ، بعد أن رأينا أن كلا منها يميل إلى التفريط فى ألكتروناته . والواقع أنه فى مثل هذه الظروف تكون إحدى المادتين أشد ميلا من الأخرى إلى التخلى عن إلكتروناتها ، ولذلك يبقى الشحن ممكناً ، وفى الحالة التى نحن بصددها تشاء الصدف أن يكون الفراء أكثر ميلا لفقد الألكترونات ، وعليه يكتسب الزجاج شحنة سالبة .

١١ – ٦ الموصلات وغير الموصلات :

يختص كثير من المواد بخاصية السماح للألكترونات بالتجول بين الجزيئات بقدر من الحرية . وأشد ما تظهر هذه الخاصية فى الفلزات ، حيث يوجد داخل المادة عدد وفير من الألكترونات « الحرة » ، التى تستطيع التحرك بسهولة بتأثير القوى الكهربية . وفى مواد أخرى يكون عدد الألكترونات الحرة قليلا أو منعدماً بسبب اختلاف ترتيب الذرات أو اختلاف ترتيب الألكترونات فى الذرات . ومع أنه لا يوجد فاصل واضح بين الأجسام التى تحتوى على شحنات حرة وبين الأجسام التى لا تحتوى على شحنات حرة ، فقد جرت العادة على إطلاق أسماء على هاتين الفصيلتين المتطرفتين من المواد . فسميت المواد التى تكثر فيها الألكترونات الحرة بالموصلات ، كما سميت المواد التى تشح فيها الألكترونات الحرة بغير الموصلات أو العوازل .

ولا توجد مادة توصل الكهربا توصيلا تاما أو تعزل الكهربا عزلا تامًّا . ومن بين الجوامد تعتبر الفلزات بوجه عام جيدة التوصيل للكهربا . أما اللافلزات فتتراوح مراتبها بين العوازل المتوسطة والعوازل الجيدة . وبعض السوائل موصلات لا بأس بها بسبب وجود أيونات حرة ، فى حين أن بعضها الآخر عوازل بسبب قلة الأيونات فيها . والأرض نفسها توصل توصيلاً لا بأس به. وذلك بسبب الأيونات التى تتواجد فى التربة الرطبة . كما أن جسم الإنسان أيضاً يعتبر موصلاً لا بأس به ، وذلك بسبب الأيونات الموجودة فى سوائل الجسم وفى الخلايا وعلى سطح الجلد . وإذا لمسنا قضيباً من المطاط المشحون بشحنة سالبة بقطعة من الزجاج مثلا ،

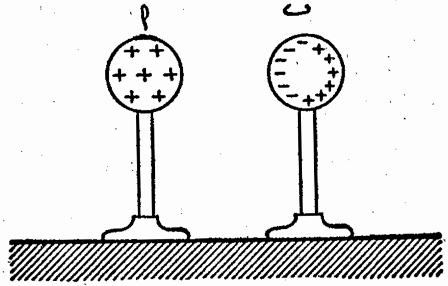
فلن يفقد من الشحنة إلا النزر اليسير ، وذلك لأنه لا المطاط ولا الزجاج يسمح بتوصيل الشحنة بسهولة . ولكن إذا مسحنا القضيب المشحون براحة اليد، فلن يبقى عليه من الشحنة إلا القليل أو العدم ، إذ أن الرطوبة الموجودة على سطح اليد توصل الزائد من الألكترونات إلى سطح الجسم، ومن ثم تسير هذه الألكترونات فى النهاية إلى الأرض خلال الحذاء وأرضية الغرفة وما نحو ذلك . وعملية معادلة شحنة جسم مشحون بلمسه بوساطة موصل متصل بالأرض إما مباشرة وإما بطريق غير مباشر تسمى توصيل الشحنة بالأرض . وبتوصيل جسم مشحون بشحنة سالبة بالأرض ، تنزف إلكتروناته الزائدة إلى الأرض (شكل ١١ — ٤) . وبتوصيل جسم موجب الشحنة بالأرض ، تسرى إليه إلكترونات من الأرض لتكمل العجز فيه . ويمكننا أن نفترض أن الأرض من الضخامة بحيث تستطيع أن تمتص كل الألكترونات الفائضة التى تعطى لها ، كما تستطيع إذا دعا الأمر، أن تمد الأجسام بكل ما ينقصها من إلكترونات .



(شكل ١١ — ٤)

١١ — ٧ الشحنة الناتجة بالتأثير :

افرض أن كرة من النحاس قد ركبت فوق ساق من الزجاج ثم شحنت بشحنة موجبة . (يمكن إجراء ذلك بلمسها مرات متكررة بقضيب من الزجاج المدلوك بالحرير ، أو بتوصيلها بآلة إلكتروستاتيكية تؤدى فى الواقع عملية الدلك واللمس آليًّا) . فبما أن الكرة موصلة فسوف يتوزع عليها النقص فى



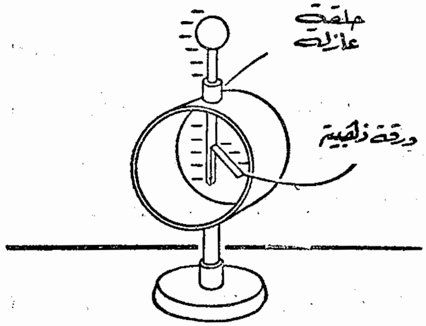
(شكل ١١ — ٥)

الألكترونات ، ولكن ساق الزجاج العازل الذى يحملها سيعمل على عزلها عن الأرض فيمنع الأرض من أن تعادل العجز . فإذا أدنينا من هذه الكرة كرة معدنية أخرى غير مشحونة (شكل ١١ — ٥) فسينشأ تجاذب إلكتروستاتيكى — تجاذب كولومى — بين الكرة ا ، وبين الألكترونات الحرة فى الكرة ب . وبما أن الكرة ب موصلة فسوف تسير إلكتروناتها الحرة بتأثير قوة التجاذب إلى المنطقة الأكثر قرباً من ا ، مما يترك عجزاً فى الجانب البعيد من ب . ومع أن الكرة ب لا تزال فى مجموعها غير مشحونة ، إلا أن شحناتها قد تغير توزيعها ، فنشأت منطقتان مختلفتا الشحنة . وبما أن الشحنتين فى هاتين المنطقتين إنما ظهرتا بتأثير الكرة ا ، لذا يقال : إنهما شحنتان نتجتا بالتأثير أو تأثيريتان . وإذا أزيحت الكرة ا ، تعود الكرة ب إلى حالتها الأولى التى ليس فيها انفصال فى الشحنات .

على أنه فى الإمكان ، أن نكسب الكرة ب شحنة خالصة بدون ملامستها بالكرة ا إطلاقاً . ويتم ذلك على النحو التالى . . إذا وصلنا الجانب الأيمن من الكرة ب بالأرض بملامسته باليد أثناء تأثير الكرة ا على الكرة ب وانفصال شحنات هذه الأخيرة ، فسوف تزود الأرض الجانب الأيمن بما ينقصه من الإلكترونات ، أما الفائض من الألكترونات على الجانب الأيسر من ب فسيبقى مقيداً بالقوة الكولومية للكرة ب ، ولن يسرى إلى الأرض . فإذا قطعنا الآن الاتصال بالأرض فبما أن الجانب الأيسر من ب كان سالباً والطرف الأيمن كان متعادلا ، فإن الكرة ب تملك شحنة سالبة خالصة . وإزالة الكرة ا تتيح للألكترونات المكونة للشحنة السالبة ، أن تعيد توزيع نفسها بالتساوى على الكرة ب . بهذه الوسيلة يمكننا أن نشحن الكرة ب بالتأثير بدون استنفاد أى جزء من شحنة الكرة ا . وطبيعى أن الأرض هى التى مدت الكرة ب بالألكترونات الزائدة . وتنعكس عملية التأثير هذه تماماً، بكل تفاصيلها، إذا بدأنا بالكرة ا مشحونة بشحنة سالبة . فالإلكترونات الحرة الموجودة على الكرة ب تزاح إلى الجانب الأيمن منها ، ومن ثم تسرى إلى الأرض عند توصيل ب بالأرض ، أما العجز الناشئ على الجانب الأيسر من ب فيتوزع خلال ب . ويلاحظ أن إشارة الشحنة التى تظهر على جسم مشحون بالتأثير ، تكون دائماً بعكس إشارة الشحنة المؤثرة .

١١ – ٨ الإلكتروسكوب :

الألكتروسكوب جهاز يستخدم فى الكشف عن وجود الشحنة (شكل ١١ – ٦) وهو فى أبسط صوره لا يعطى إلا معلومات وصفية ، على أنه يمكن كذلك أن يصنع بعناية تكفى لكى يسمح الجهاز بإجراء قياسات دقيقة . وهو يتكون عادة ، من شريحة رقيقة من الألمنيوم أو الذهب ، يلتصق طرفها العلوى بقضيب موصل يبرز من حلقة عازلة مثبتة فى سقف علبة لها جوانب زجاجية . وينتهى القضيب عادة بكرة أو قرص . فإذا ما أعطيت شحنة للقضيب ، فإن الورقة الذهبية تشاركه فيها فيبتعد طرفها الحر عنه بتأثير قوة التنافر الكولومى . (وجلى أن هذا ما يحدث سواء كانت الشحنة سالبة أو موجبة) . ويظل انفراج الورقة بالنسبة للقضيب ثابتاً طالما بقى القضيب والورقة منعزلين عن تأثير أى شحنات إضافية .



(شكل ١١ – ٦)

افرض أن الالكتروسكوب قد شحن بملامسته بقضيب مشحون من المطاط الصلد . فى هذه الحالة يكتسب القضيب والورقة مزيداً من الإلكترونات . فإذا أدنينا من ذلك الألكتروسكوب جسما مشحوناً بالكهربا السالبة ، فسيترتب على ذلك إزاحة المزيد من الإلكترونات إلى الطرف السفلى ، ويزداد الانفراج بين الورقة والقضيب. وعلى العكس ، إذا قربنا جسماً مشحونًا بالكهربا الموجبة ، فإنه يحدث شحنة تأثيرية موجبة على الطرف البعيد عن الورقة فتنكمش انكماشاً جزئيًّا نحو القضيب ، نرى من ذلك أن الإلكتروسكوب المشحون يمكن استعماله للكشف عن وجود الشحنة وكذلك لمعرفة إشاراتها .

ويمكن شحن الإلكتروسكوب إما بالتلامس وإما بالتأثير . وتماثل هذه الطريقة الأخيرة الطريقة التى شرحناها فى معرض الحديث عن شحن الكرة ب شكل ١١ – ٥ . فيقرب قضيب مشحون من قرص الإلكتروسكوب ، وتفرغ

الشحنة التأثيرية البعيدة فى الأرض بلمس القرص ، ثم يقطع الاتصال بالأرض وأخيراً تبعد الشحنة المؤثرة ، فنجد أن الشحنة التى كانت مقيدة بالشحنة المؤثرة تتوزع على القضيب والورقة ، فتنفرج هذه الأخيرة متنافرة من القضيب .

تمارين

١ — وضعت شحنة مقدارها + ٤٠ وحدة إلكتروستاتيكية على بعد ١٠ سم من شحنة مقدارها — ٩٠ وحدة إلكتروستاتيكية . ما مقدار القوة بين الشحنتين وما هو اتجاهها بالنسبة إلى الشحنة + ٤٠ و . ا . س . ؟

الجواب : ٣٦ داين

٢ — وضعت شحنة مقدارها ٣ × $١٠^{٩}$ و.ا.س . على بعد ١٠ أمتار من شحنة مماثلة . ما هى قوة التنافر ؟

الجواب : ٩ × $١٠^{١٢}$ داين

٣ — شحنة مقدارها ٦ × $١٠^{٣}$ و.ا. س . تبعد متراً واحداً عن كرة من نخاع البيلسان كتلتها ٣ جم وتحمل شحنة مقدارها ٣٠٠ و.ا. س . ما هى العجلة الابتدائية لكرة نخاع البيلسان ؟

الجواب : ٦٠ سم / $ث^{٢}$

٤ — تقع ثلاث كرات مشحونة ا ، ب ، حـ فى صف واحد . وتحمل ا شحنة مقدارها — ٥٠٠٠ و.ا. س . وتحمل ب شحنة مقدارها — ١٠٠٠ و . ا . س . وتحمل حـ شحنة مقدارها — ٢٠٠٠ و . ا س والبعد بين ا ، ب متران ، وبين ب ، جـ متر واحد . أوجد القوة المؤثرة على الكرة الوسطى . ما اتجاه هذه القوة ؟ الجواب : ٧٥ داين

٥ — تقع شحنة مقدارها + ٤٠٠ و . ا . س . فى أحد أركان مربع طول ضلعه ١٠ سم . وعلى الركن المقابل توجد شحنة مقدارها + ٣٠٠ و . ا . س . أوجد القوة الكلية المؤثرة على شحنة مقدارها + ١٠ و.ا. س . موضوعة فى ركن ثالث من أركان المربع .

الجواب : ٥٠ داين

٦ — شحن إلكتروسكوب بالتأثير بوساطة قضيب زجاجى دلك بالحرير ، ثم قربت شحنة مجهولة من الإلكتروسكوب ، فلوحظ انكماش الورقتين . ما إشارة الشحنة المجهولة ؟

مراجع مقترحة للاطلاع .

Bragg, Sir William, "Electricity", New York, The Macmillan Co., 1936.

مجموعة من المحاضرات العامة عن الظواهر الكهربية .

Magie, W. F., "Source Book in Physics", New York, McGraw-Hill Book Co., 1935.

فى ص ٤٠٨ عرض لتجارب كولوم الأصلية عن قانون القوة بين شحنتين كهربيتين .

الفصل الثانى عشر

المجال الكهربى وفرق الجهد

١٢ ــ ١ المجال الإلكتروستاتيكى :

عند وصف التفاعل بين الشحنات الكهربية لا يجوز لنا القول بأن الشحنة تبذل قوة عند نقطة معينة فى الفضاء دون سواها ، كما هو الشأن فى حالة الزمبرك المشدود مثلا . فنحن ندرك أن الشحنة الكهربية لها فعل منتشر خلال الفضاء المحيط بها ، ومثل هذا الوضع يحدث أيضاً فى حالة قوة الجاذبية النيوتنية ، التى لا يقتصر تأثيرها على كتلة بالذات تقع عند خط عرض وخط طول معينين ، بل يمتد فيشمل كافة الكتل المجاورة حيثما وجدت . والواقع أن هذا الجوار يمتد إلى ما لا نهاية ، ولو أن القوة تصبح على الأبعاد الكبيرة مهملة من الناحية العملية نتيجة لطبيعة التربيع العكسى لقانون القوة . وللتدليل على هذا الفعل الموضعى للقوى الجاذبية والإلكتروستاتيكية نشأت فكرة مجال القوة ، أو ما نسميه ــ إيجازاً ــ بالمجال . والمجال هو كل الحيز الذى نشعر فيه بوجود قوة . ومع أننا لم نلجأ كثيراً إلى فكرة المجال عند مناقشتنا لقوة الجاذبية النيوتنية ، إلا أن فكرة المجال تصبح أبلغ جدوى فى موضوع الإلكتروستاتيكا .

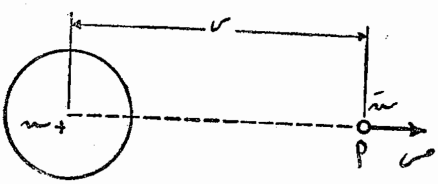
ويعرف المجال فى الإلكتروستاتيكا كما يلى : مجال القوة الإلكتروستاتيكية هو أية منطقة يعانى فيها الجسم المشحون قوة . ويلاحظ أننا لم نذكر شيئاً عن مصدر ذلك المجال . وحكمنا بسيط ــ فإذا وضعت شحنة اختبار عند نقطة معينة فى المنطقة ، ووجد أنها تعانى قوة تؤثر عليها ، فحينئذ وبموجب التعريف يكون هناك مجال عند تلك النقطة .

وشدة أو قوة المجال الإلكتروستاتيكى هى المقياس الكمى للمجال . وتعرف لفظا بالقوة المؤثرة على شحنة موجهة مقسومة على مقدار هذه الشحنة . ويرمز لشدة المجال الكهربى بالرمز $\overrightarrow{\text{م}}$. وعليه ، فإن :

$$\vec{\text{م}} = \frac{\vec{\text{ق}}}{\text{س}'} \qquad (١٢ - ١)$$

حيث $\vec{\text{ق}}$ القوة . وقد وضعت الفتحة فوق الشحنة س' للدلالة على أنها شحنة اختبار . وشدة المجال كمية متجهة ، وقد تخيرنا أن تكون الشحنة س' موجبة لتبيان اتجاه المتجهة $\vec{\text{م}}$. ووحدة شدة المجال هى الداين لكل وحدة إلكتروستاتيكية للشحنة.

وبالاستعانة بقانون « كولوم » يمكننا أن نحسب $\vec{\text{م}}$ فى حالة مشهورة جداً ، ونعنى بها حالة المجال الناشىء عن شحنة نقطية أو كرة مشحونة بانتظام (يمكن دائماً اعتبار التوزيع الكروى المنتظم للشحنة بمثابة شحنة مركزة عند مركز الكرة) .



(شكل ١٢ – ١)

سنفرض أن لدينا كرة مشحونة بشحنة س (شكل ١٢ – ١) ، وسنبحث عن شدة المجال عند النقطة ا التى تبعد مسافة ر عن المركز . فبمقتضى التعريف نتصور شحنة اختبار س' موضوعة عند ا ، فتكون شدة المجال $\vec{\text{م}}$ هى القوة المؤثرة عليها مقسومة على س'. وعليه ، فبوضع الشحنة س' عند النقطة ا ، يمكننا أن نحسب هذه القوة من قانون كولوم

$$\vec{\text{ق}} = \frac{\text{س س}'}{\text{ر}^2}$$

وإذن ، فمجال الشحنة النقطية هو

$$\vec{\text{م}} = \frac{\vec{\text{ق}}}{\text{س}'} = \frac{\text{س}}{\text{ر}^2}$$

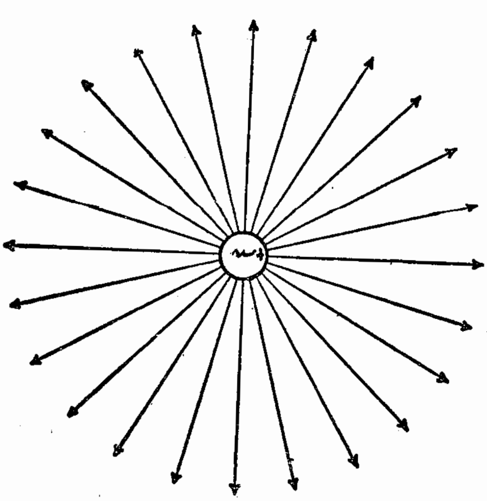
واتجاه $\vec{\text{م}}$ يتوقف على إشارة الشحنة الكروية المحدثة للمجال . فإذا كانت موجبة فاتجاه $\vec{\text{م}}$ إلى الخارج بالنسبة للشحنة المولدة للمجال . وإذا كانت سالبة فاتجاه $\vec{\text{م}}$ صوب هذه الشحنة ، وذلك لأن هذين الاتجاهين هما اتجاها القوى المؤثرة على س' فى الحالتين . وإذا كانت الشحنة المسببة للمجال ليست شحنة نقطية ،

ولا هى شحنة موزعة توزيعاً كرويا متماثلا ، فيتحتم تقدير المجال $\vec{E}$ بتجميع المجالات الناشئة من سائر الشحنات التى تتركب منها هذه الشحنة . وعملية التجميع هذه تتضمن عادة استخدام حساب التكامل .

١٢ — ٢ خطوط القوة الإلكتروستاتيكية :

من الجلى أنه بحساب قيمة لكل نقطة من نقط الحيز المحيط بشحنة ، يمكننا أن نحصل على وصف كامل للمجال الناشىء عن تلك الشحنة . ونستطيع أن نلخص هذه العملية الشاقة بإدخال فكرة خطوط القوة. وخط القوة هو خط فى الفضاء يتجه عند كل نقطة نحو المجال الكهربى . ولكى نتخيل ذلك نضع شحنة اختبار (وقد اصطلح على أن تكون شحنات الاختبار دائماً موجبة) عند أية نقطة فى الفضاء ، ونسمح لها بأن تتحرك قليلا تحت تأثير القوة الكهربية ، فترسم قطاعاً قصيراً من المسار . وتكرر العملية عند نهاية كل قطاع ، فنحصل على سلسلة متصلة من القطاعات تكون خطا اتجاهه عند كل نقطة هو اتجاه القوة المؤثرة على شحنة الاختبار . وواضح أنه يمكننا ، بتغيير نقطة الابتداء ، رسم عدد لا نهائى من مثل هذه الخطوط . وتمثل خطوط القوة هذه المجال الكهربى بطريقة بيانية .

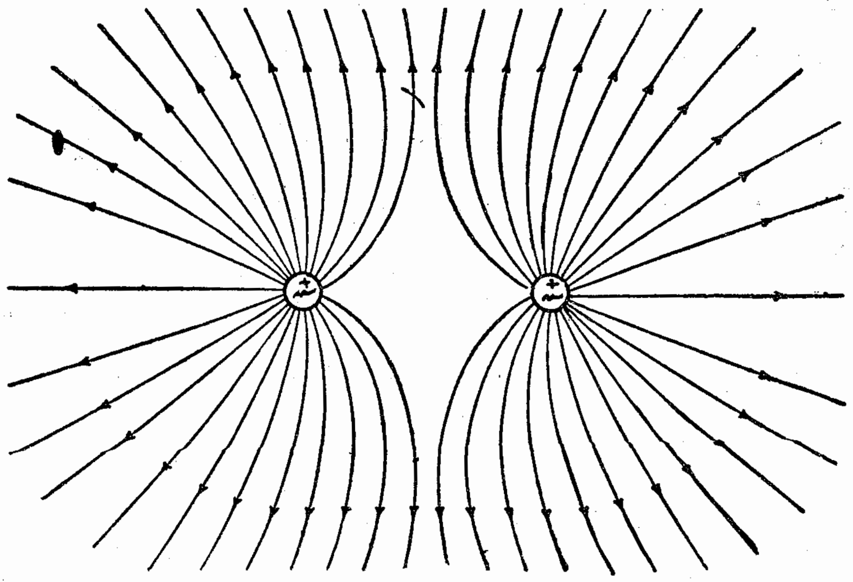
وترى فى شكل ١٢ —٢ خريطة للمجال الناشىء من شحنة منعزلة . ويلاحظ أن خطوط القوة فى هذه الحالة قطرية وتمتد إلى ما لا نهاية إذا كانت الشحنة منعزلة حقًّا عن كل ما عداها . ويرى المجال الناشىء من شحنتين متضادتين فى شكل ١٢ — ٤ ، كما يرى المجال الناشىء من شحنتين متماثلتين فى شكل ١٢ — ٣ .



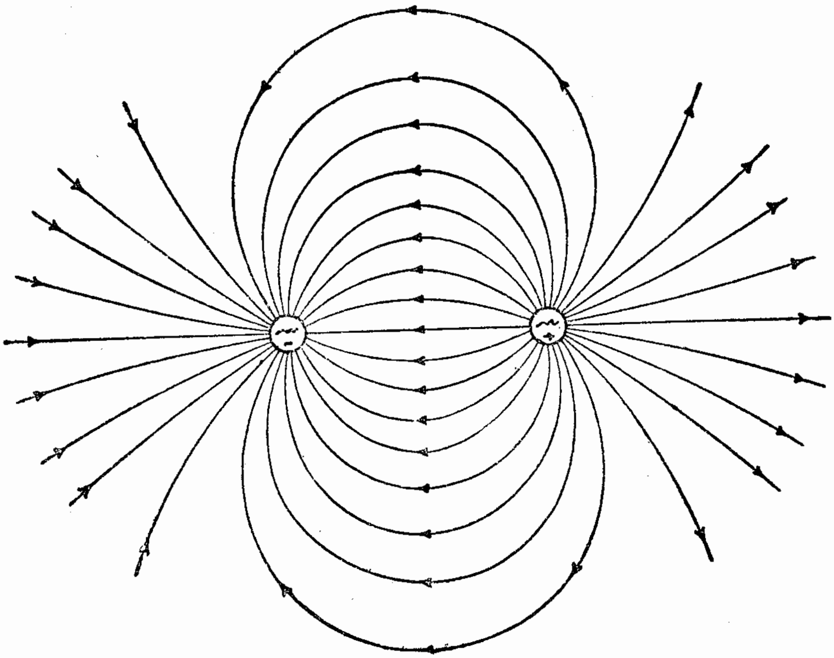
(شكل ١٢ —٢)

ويعطى هذان الشكلان توضيحاً تصويرياً لاتجاه القوة بين شحنتين متضادتين وشحنتين متماثلتين ، ففى حالة الشحنتين المتضادتين تبدو خطوط القوة كما لو كانت تربط الشحنتين إحداهما بالأخرى ، فى محاولة ظاهرة لإنقاص المسافة بينهما ، والأمر بالعكس فى حالة الشحنتين المتماثلتين ، إذ تبدو خطوط القوة بينهما كما لو كانت تدفع إحداهما الأخرى بعيداً عنها . ويلاحظ فى شكل ١٢ — ٣ وجود منطقة بين الشحنتين خلت تماماً من خطوط القوة . هذه المنطقة هى منطقة تعادل ينعدم فيها المجال .

وبالرغم من أن خطوط القوة ليست إلا فكرة خيالية افتراضية لتتبع خط سير شحنة الاختبار ، فهى فكرة مثمرة جداً فى الكهربا إلى حد أنها أصبحت تتسم عادة بلمسة من الحقيقة تدعونا إلى تصوير الشحنة كما لو كانت مزودة بخيوط استشعار منتشرة تنثنى عند الاقتراب من شحنة أخرى . بل قد يجرى الحديث عن « قطع خطوط القوة » كما لو كان عملية جراحية .

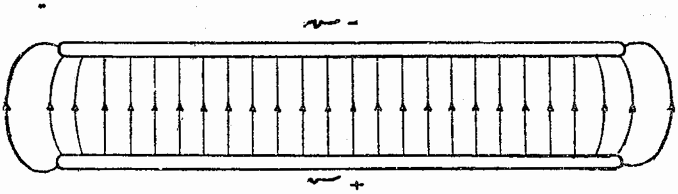


(شكل ١٢ — ٣)



(شكل ١٢ – ٤)

والمجالات الناشئة من الشحنات النقطية أو من مجموعات من الشحنات النقطية كلها مجالات غير منتظمة . وبقدر ما نقترب من مصدر المجال يزداد المجال ($م = \frac{س}{ر^{٢}}$) . وثمة حالة بسيطة يكون المجال فيها منتظماً . ألا وهى حالة المجال بين لوحين متوازيين مشحونين (شكل ١٢ — ٥) . فهنا تكون خطوط القوة خطوطاً مستقيمة ومتوازية ، ويأخذ المجال القيمة نفسها عند كافة النقط الواقعة بين اللوحين ، اللهم إلا عند الأطراف حيث تنحنى الخطوط . ويلعب المجال المنتظم دوراً هامًّا جدًّا فى تجارب الفيزياء الذرية ، وسنشير إلى ذلك كثيراً فيما بعد .



(شكل ١٢ – ٥)

١٢ ــ ٣ الجهد وفرق الجهد :

لقد اكتملت الخطوة الأولى من تقدمنا فى تفهم طبيعة إلكتروديناميكا الجسيمات . فأصبحنا نميز من حيث الكيف والكم القوى الناشئة عن شحنات ساكنة . وقبل أن ننتقل إلى دراسة الشحنات المتحركة يجمل بنا أن نبحث فى المسائل الباقية فى الإلكتروستاتيكا ، ألا وهى طاقة الشحنة الساكنة . ويقال فى عالم الديناميكا ، إن الكتلة الساكنة تمتلك بفضل موضعها طاقة جهد (أو طاقة وضع) . والواقع ، كان الأحرى بنا أن نسميها « طاقة فرق الجهد » ، إذ أنها تقاس دائماً بالنسبة لمستوى معين . فمثلا طاقة الجهد لكتاب موضوع على مكتب بالنسبة لأرضية الغرفة تختلف عن طاقته بالنسبة لسطح الأرض ، ومن المحتمل أن تختلف بالنسبة لسطح البحر ، وهلم جرّا . والتعبير الذى يعطى طاقة الجهد التثاقلى ، وهو ك حـ ع ، إنما يقيس طاقة فرق الجهد المناظرة لارتفاع ع فوق مستوى اختبارى معين .

والوضع مماثل لذلك تماما فى الكهربا . إذ يمكننا أن نحدد ما نقصد بفرق الجهد الإلكتروستاتيكى ، ولكن متى أردنا تعريف الجهد المطلق ، فلا مناص من انتقاء مرجع اختيارى للجهد . (وليس لدينا فى الإلكتروستاتيكا مرجع مناسب للجهد يناظر أرضية الغرفة ، أو سطح الأرض ، أو مستوى البحر ، أو ما نحو ذلك) . ويعتبر الجهد الكهربى حالة مميزة لنقطة فى الفضاء ، سواء كانت هذه النقطة مشغولة أو غير مشغولة بالمادة . وعلى هذا الاعتبار يكون تعريف فرق الجهد بين نقطتين فى الفضاء هو مقدار الشغل المبذول فى نقل شحنة من إحدى النقطتين إلى الأخرى مقسوماً على الشحنة . ويلاحظ أن فرق الجهد الكهربى ، إنما هو شغل لوحدة الشحنة ، وليس شغلا فحسب . ووحدته هى الإرج لكل وحدة إلكتروستاتيكية للشحنة . ويمكننا القول بأن فرق الجهد بين نقطتين هو الشغل المبذول على وحدة الشحنة لنقلها من إحدى النقطتين إلى الأخرى . وسنعتبر الشحنة المنقولة شحنة اختبار موجبة سـحـَ ، كما تعودنا . فإذا كانت النقطتان هما ا ، ب (شكل ١٢ ــ ٦) فإن :

$$ف_{اب} = \frac{ش}{س} \qquad (٢٢ - ١)$$

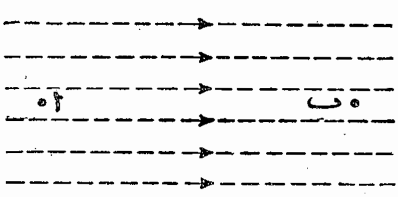
حيث ش الشغل المبذول ، $ف_{اب}$ فرق الجهد بين ا ، ب . ولما كان الشغل ينتج من حاصل ضرب قوة فى مسافة ، فمن الجلى أنه لابد من وجود مجال كهربى لكى ينشأ فرق جهد .

ولكى نعرف الجهد المطلق ، سننتخب نقطة اختبارية جهدها صفر ، ولتكن هذه النقطة فى ما لا نهاية . ونقصد بما لا نهاية . . مسافة تبلغ عدة أضعاف المسافات التى نقابلها فى الموضوع الذى نبحثه . واختيارنا هذا سليم ، بسبب انعدام القوة المؤثرة على الشحنة فى مالا نهاية ($ق = \frac{س س^-}{\infty^{٢}} =$ صفراً) . وحينئذ فالجهد المطلق عند نقطة ا هو مقدار الشغل اللازم لنقل شحنة من ما لا نهاية إلى تلك النقطة ، مقسوماً على الشحنة . أى أن

$$ف_{ا} = \frac{ش}{س}$$

وبما أننا عادة لا نتناول المسافات المتناهية الطول فى المعمل ، ففرق الجهد بين نقطتين هو الكمية التى تعنينا فعلا . ولهذا ، وفيما عدا بعض الحالات المعينة ، فسوف نسقط الدليل ا ب المكتوب أسفل الكمية $ف_{اب}$ فى المعادلة (١٢ — ٢) ، ونكتفى بكتابة ف كلما قصدنا فرق الجهد .

وتتحدد إشارة ف بمنتهى البساطة . وهى تتبع القاعدة نفسها المتبعة فى حالة طاقة الجهد التثاقلى . فإذا اكتسبت الشحنة الموجبة طاقة حركة عند انتقالها من ا إلى ب يكون جهد ا أعلى من جهد ب (كأن الشحنة قد سقطت من سفح تل) . أما إذا استدعى الأمر بذل شغل على الشحنة لنقلها من ا إلى ب فيكون جهد ب هو الأعلى . وفى كلتا الحالتين يكون فرق الجهد هو الشغل مقسوماً على الشحنة المنقولة (أى الشغل لوحدة الشحنة) .



(شكل ١٢ — ٦)

وحساب طاقة الجهد التثاقلى للكتل القريبة من سطح الأرض مسألة يسيرة ، لأن مجال الجاذبية النيوتنية منتظم خلال المسافات الصغيرة نسبيًّا ، التى تتضمنها المسألة ، ولذا فالقوة (ك حـ) ثابتة ، ولا يصدق ذلك على حالة المجال الناشىء من شحنة نقطية ، إذ أن القوة تتغير مع المسافة ، وليس ثمة طريقة بسيطة لحساب الشغل الكلى . وهنا يزودنا حساب التكامل مرة أخرى بالجواب الذى سنكتبه بدون برهان : الجهد المطلق الناشىء من شحنة سـ عند نقطة أ تبعد عنها مسافة ر َ هو :

$$ف_{ا} = \frac{س}{رَ} \qquad (١٢ - ٣)$$

وفرق الجهد بين نقطتين تبعدان عن الشحنة سـ بالمسافتين ر َ ، ر ً ينتج مباشرة من التعبير السابق :

$$ف = ف_{ا} - ف_{ب} = \frac{س}{رَ} - \frac{س}{رً} = س \left(\frac{١}{رَ} - \frac{١}{رً} \right)$$

(إذا كان المجال ناشئاً من شحنة نقطية) .

وفى حالة المجال المنتظم — كالمجال بين صفيحتين متوازيتين مشحونتين — يكون حساب فرق الجهد سهلا هينا . فالقوة هنا ثابتة ، وعليه فالشغل هو — بكل بساطة — ش = ق × ء حيث ء المسافة بين اللوحين . وحينئذ ، فمن تعريف المجال :

$$م = \frac{ق}{سَ} \qquad \therefore ق = م سَ$$

$$\therefore ش = م سَ ء$$

ومنها

$$ف = \frac{ش}{سَ} = م ء$$

(إذا كان المجال منتظماً) .

ومن الناحية العملية ، يستخدم هذا التعبير عادة لحساب م ، إذ أن قياس فرق الجهد أيسر كثيراً من قياس المجال .

١٢ — ٤ الوحدات العملية للكميات الكهربية :

إلى هنا كانت الكميات الثلاث التى تناولناها بالمناقشة فى موضوع الكهربا

هى الشحنة الكهربية س ، شدة المجال الكهربى م ، فرق الجهد الكهربى ف . وقد اشتقت الوحدات التى ميزناها بها من وحدات السنتيمتر جرام ثانية (س . ج . ث.) للكميات الديناميكية الداخلة فى وصفها ، ألا وهى القوة والمسافة والشغل ، وكان الاسم الوحيد الذى أطلق على هذه الوحدات الكهربية هو الوحدات الإلكتروستاتيكية (و . ا .س.) فمثلا وحدة فرق الجهد الإلكتروستاتيكية هى الإرج للوحدة الإلكتروستاتيكية للشحنة . وحينما تجىء دراسة الكهربية التيارية سنواصل الاشتقاق من وحدات س .ج. ث . غير أننا سنجد أن حجم كثير من وحدات س .ج. ث. الكهربية غير مناسب للقياسات العادية . ولهذا نشأ نظام آخر من الوحدات يعرف بنظام الوحدات العملية . وفى هذا النظام استعيرت أسماء أعلام من أسماء الرواد الأوائل فى الكهربا وأطلقت على الوحدات الكهربية . والعلاقات بين قيمة الوحدة العملية وقيمة وحدة س .ج. ث . المناظرة لها ليست اختيارية تماماً ، كما قد تبدو هنا ، على أننا لن نحاول تبرير هذه العلاقات .

الشحنة س : وحدة س . ج . ث . هى و . ا . س . للشحنة .
الوحدة العملية هى الكولوم .
النسبة هى ١ كولوم = ٣ × ١٠^٩ و . ا . س . للشحنة .

فرق الجهد ف : وحدة س . ج . ث . هى أرج لكل و . ا . س . للشحنة أو ببساطة و . أ . س . لفرق الجهد .
الوحدة العملية هى الفولط .
النسبة هى ١ فولط = $\frac{١}{٣٠٠}$ و . ا . س . لفرق الجهد .

الشغل ش : وحدة س . ج . ث . هى الإرج .
الوحدة العملية هى الجول .
النسبة هى ١ جول = ١٠^٧ إرج .

القدرة د : وحدة س . ج . ث . هى ارج / ث
الوحدة العملية هى جول/ث أو واط

التسبة هى ١ واط = $١٠^{٧}$ ارج / ث .

شدة المجال الكهربى م : وحدة س . ج . ث هى داين لكل و . ا . س . للشحنة .
أو ببساطة و . ا . س . لشدة المجال .
الوحدة العملية : لم تستعمل أى وحدة عملية فى هذا الكتاب ولكن يمكن تعريفها بالفولط / متر .

ومن الواضح أن العلاقة بين نظام الوحدات العملية وبين نظام وحدات س ج . ث. ليست علاقة بسيطة . وقد أدخلنا الوحدات العملية لشيوع استعمالها فى العلم والصناعة ، غير أن استخدامها ينبغى أن يقترن بكلمة تحذير ، فهذه الوحدات لا ينبغى استعمالها إلا فى المعادلات التى يعبر فيها عن كل كمية بوحدة عملية . فمثلا فى قانون كولوم ق = $\frac{س_ح س_ح^-}{ر^٢}$ ، يتحتم أن تكون $س_ح$ ، $س_ح^-$ بوحدات س . ج . ث لأننا لا نستخدم أية وحدة عملية للتعبير عن ق أو ر . وفى تعريف فرق الجهد ف = $\frac{ش}{س_ح}$ ، يجوز أن نعبر عن كل الكميات بالوحدات العملية .

مثال ١ : شحنة موجبة مقدارها $١٠^{-٦}$ كولوم (أى ١ ميكروكولوم) أعطيت لكرة صغيرة . أوجد شدة المجال والجهد المطلق عند نقطة تبعد ١٠٠ سم من مركز الكرة .

المعلوم : $س_ح = ١٠^{-٦}$ كولوم ، ر = ١٠٠ سم
م = ؟ ، ف = ؟

الحل : المجال الناشىء من شحنة نقطية ، أو من توزيع كروى يتعين من ق = $\frac{س_ح}{ر^٢}$

وبما أن هذا القانون يشتمل على المسافة فلابد من استخدام وحدات س. ج ، ث.

$$س_ح = ١٠^{-٦} \text{ كولوم } = ١٠^{-٦} \times ٣ \times ١٠^{٩} \text{ و . ا . س .}$$

$$\therefore م = \frac{٣ \times ١٠^{٣}}{(١٠٠)^{٢}} = ٠{,}٣ \text{ و . ا . س . للمجال}$$

واتجاه مـ هو الاتجاه الذى تتحرك فيه شحنة اختبار موجبة ، أى بعيداً عن الكرة المشحونة . وهذا هو أحد الجوابين المطلوبين .

الجهد الناتج من شحنة كروية هو

$$\text{ف} = \frac{\text{س}}{\text{ر}}$$

وهنا أيضاً لابد من استعمال وحدات س . جـ . ث . ولو أننا نستطيع تحويل الجواب إلى الوحدات العملية إذا شئنا .

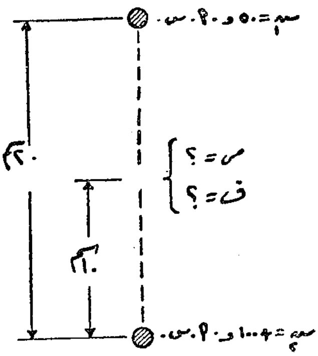
$$\text{ف} = \frac{٣ \times ١٠^{٣}}{١٠٠} = ٣٠ \text{ و . ا . س . للجهد}$$

$$= ٣٠ \times ٣٠٠ = ٩٠٠٠ \text{ فولت}$$

وهذا هو الجواب الثانى :

والجهد كمية قياسية (لأنه شغل لوحدة الشحنة) . ولذا فليس له اتجاه .

مثال ٢ : أوجد المجال والجهد المطلق عند نقطة تقع فى منتصف المسافة بين شحنتى نقطتين البعدُ بينهما ٢٠ سم ، وإحداهما سالبة ومقدارها ٥٠ و . ا . س . ، والأخرى موجبة ومقدارها ١٠٠ و . ا . س (انظر شكل ١٢ — ٧) .



(شكل ١٢ — ٧)

المعلوم : $\text{س}_{١} = -٥٠$ و . ا . س . ، $\text{س}_{٢} = +١٠٠$ و . أ . س .

المسافة الفاصلة = ٢٠ سم .

مـ = ؟ ، ف = ؟ عند منتصف المسافة .

الحل : محصلة المجال على بعد ١٠ سم من كل من الشحنتين هى المجموع المتجه للمجالين الناشئين من الشحنتين . وحينئذ :

$$\text{مـ}_{١} = \frac{\text{س}_{١}}{\text{ر}^{٢}} = \frac{٥٠}{١٠^{٢}} = ٠{,}٥ \text{ و . ا . س. صوب } \text{س}_{١} \text{ .}$$

$م_٢ = \frac{س_٢}{ر^٢} = \frac{١٠٠}{١٠^٢} = ١,٠$ و . ا . س . بعيداً عن $س_٢$

المحصلة :

$م = م_١ + م_٢ = ٠,٥ + ١ = ١,٥$ و . ا . س .

واتجاهها صوب س . وهذا هو المطلوب أولا .

وأيضاً ، الجهد الكلى هو المجموع العددى للجهود الناشئة من كل شحنة على حدة .

$ف_١ = \frac{س_١}{ر} = - \frac{٥٠}{١٠} = - ٥$ و . ا . س .

$ف_٢ = \frac{ش_٢}{ر} = \frac{١٠٠}{١٠} = + ١٠$ و . ا . س .

المجموع $ف = ف_١ + ف_٢ = - ٥ + ١٠ = ٥$ و . ا . س .

= ١٥٠٠ فولط وهو المطلوب الثانى .

مثال ٣ : يوجد فرق جهد مقدارة ٣٠٠٠ فولت بين لوحين متوازيين البعد بينهما ٢ سم . ما هى شده المجال بين اللوحين ؟

المعلوم ف : = ٣٠٠٠ فولت = ١٠ و . ا . س .

ء = ٢ سم ، م = ؟

الحل : ف = م ء ∴ ١٠ = م × ٢

∴ م = ٥ و . ا . س . لشدة المجال وهو المطلوب

مثال ٤ : ما مقدار طاقة الحركة التى تكتسبها شحنة مقدارها ٢ كولوم إذا تحركت بتأثير فرق جهد مقداره ١٠٠ فولط ؟

المعلوم : س = ٢ كولوم ، ف = ١٠٠ فولت

ش = ؟

الحل : $ف = \frac{ش}{س}$ ∴ $١٠٠ = \frac{ش}{٢}$

∴ ش = ٢٠٠ چول = ٢×١٠^٩ إرج وهو المطلوب

تمارين

١ ــ أوجد شدة المجال الكهربى عند نقطة تبعد ٢٠ سم من شحنة نقطية مقدارها ٦٠٠٠ و . ا . س . ما اتجاه المجال ؟

الجواب : ١٥ و . ا. س . للمجال

٢ ــ شحنة مقدارها + ٥٠٠ و . ا . س . تبعد ٤٠ سم من شحنة مقدارها ــ ٢٠٠ و . ا . س . أوجد مقدار واتجاه شدة المجال عند نقطة فى منتصف المسافة بين الشحنتين .

الجواب : ١,٧٥ و . ا . س . للمجال

٣ ــ تقع ثلاث شحنات موجبة متساوية المقدار عند رءوس مثلث متساوى الأضلاع . ارسم خطوط القوى الناشئة عنها .

٤ ــ أوجد المجال بين لوحين متوازيين تفصلهما مسافة مقدارها ١ سم ، وبينهما فرق جهد مقداره ١٠٠ فولط .

الجواب : $\frac{1}{3}$ و . ا . س . للمجال

٥ ــ وضعت عند ثلاث رءوس من مربع طول ضلعه ٥ سم ثلاث شحنات مقاديرها هى + ٢٠ و . ا . س .،و ــ ٥٠ و . ا . س .،و + ٣٠ و . ا . س . أوجد الجهد عند الرأس الرابع للمربع (وهو الركن المقابل للشحنة ــ ٥٠ و . ا . س .) .

الجواب : + ٢,٩ و . ا . س . للجهد

٦ ــ وضعت عند رءوس مربع طول ضلعه ١٠ سم شحنات متساوية مقدار كل منها + ١٠٠ و . ا . س . ما فرق الجهد بين الأركان ؟ وما الجهد عند مركز المربع ؟

الجواب : صفر، ٥٦,٥ و . ا . س .للجهد

٧ ــ ما مقدار الشغل اللازم لنقل ١٠ كولوم خلال فرق جهد مقداره ٥٠ فولت .

الجواب : ٥٠٠ چول

مراجع مقترحة للاطلاع

"A Treasury of Science", Harper and Brothers, New York, 1946.

يبين مكتشفات بنيامين فرانكلين فى الإلكتروستاتيكا .

Bragg, Sir William, "Electricity", New York, The Macmillan Co., 1936.

الفصل الأول من هذه المحاضرات العامة مخصص للظواهر الكهربية .

الفصل الثالث عشر

التيارات الكهربية

١٣ – ١ مستلزمات التيار الكهربى :

فى المناقشات التى دارت فى الفصلين السابقين ، انحصر اهتمامنا بالشحنات الساكنة فحسب : ولم نلق بالا بالعمليات التى تسرى فيها الشحنة من جسم إلى آخر . وسوف نكرس بضعة الفصول التالية لهذه الناحية الأخيرة من زوايا علم الكهربا ، وسندخل فى الموضوع رأساً : سنتساءل عن الشروط اللازمة لمرور شحنة كهربية وعن التأثيرات التى تنجم عن مرورها . وسنتناول هذه التحريات من وجهة نظر الفيزياء الذرية ،وهى وجهة نظر تعيق بطبيعة الحال الإستمتاع بالكهربا الهندسية .

فإذا وضعنا أمامنا هذا السؤال الأول من السؤالين التاليين وهو – أى الشروط تلزم لمرور شحنة كهربية – نجد أن معلوماتنا فى الكهربا الإستاتيكية تمدنا ببعض التوجيهات المفيدة . إذا وجدت نقطتان فى الفضاء (سواء كانتا مشغولتين أو غير مشغولتين بأجسام مشحونة) وكان بينهما فرق فى الجهد ، فالشحنة الموجبة تكتسب طاقة بتحركها من النقطة الأعلى جهداً إلى النقطة الأقل جهداً ، أو بعبارة أخرى ، إن الشحنة الموجبة تكتسب طاقة إذا انزلقت فى « منحدر للجهد » . وطبيعى أن المنطقة التى يوجد فيها فرق جهد يوجد فيها كذلك مجال كهربى . والقوة التى يبذلها المجال الكهربى هى مصدر حركة الشحنة . وعليه ، فلكى تتحرك الشحنة يتحتم أن يوجد فرق جهد بين نقط تمتد على طول مسار حركتها .

وواضح أن مرور التيار يتطلب ، بالإضافة إلى وجود فرق جهد ، وجود شحنات قادرة على الحركة خلال الوسط . وكما رأينا فى بند ١١ – ٦ ، يمكن تقسيم المواد إلى فصيلتين : موصلات وغير موصلات.

والموصلات هى تلك المواد التى توجد فيها شحنات قادرة على الحركة خلال

الوسط . غير أن هذه الحركة يعرقلها فى الواقع وجود ذلك العدد الكبير من الجزيئات فى الجوامد والسوائل ، إذ ينجم عنه وقوع تصادمات متتالية بين الإلكترونات الحرة المتعجلة وبين جزيئات الموصل ، فيتعذر السير على أى إلكترون دون مقاومة . ومع ذلك ، فنظراً لأن الإلكترونات الحرة فى الموصل تجد نفسها فى المجال الكهربى الناتج من فرق الجهد عبر الموصل ، فكلها تنساق للحركة فترة وجيزة جداً قبل كل تصادم ، وبذا تنتقل الطاقة بسرعة . وتعتبر الفلزات من أفضل الأمثلة على هذا الطراز من الموصلات ، وتجىء بعدها السوائل والغازات تحت ظروف خاصة .

وفى الفراغ تتحرك الشحنة بحرية تامة ، فتكتسب طاقة كلما جد بها المسير . ولما كان الفراغ لا يحوى بطبيعته أية ذخيرة من الشحنات ، فلا معدى عن تزويده بشحنات من مصدر خارجى إذا أريد لعملية التوصيل الكهربى أن تتم فيه . ولا يسوغ لنا الحديث عن الفراغ بوصفه موصلا ، بالرغم من إمكان وجود توصيل فيه .

١٣ — ٢ التيار الكهربى :

لعله ، قبل التبسط فى مستلزمات سريان الشحنة ، يجدر بنا أن نعرف الكمية التى تتيح لنا قياس السريان .

يعرف التيار بمقدار الشحنة المارة عبر نقطة فى وحدة الزمن . ويرمز للتيار بالرمز ى . وعليه فإن :

$$ى = \frac{س}{ح}$$

حيث ح الزمن الذى استغرقه مرور الشحنة س . ووحدة س . ج . ث . للتيار هى ١ و . ا . س . للشحنة فى الثانية . أما الوحدة العملية فهى ١ كولوم فى الثانية ، وتسمى بالأمبير . وعليه ، فالأمبير الواحد ينشأ من مرور كولوم واحد عبر النقطة فى الثانية . والأمبير يكافىء ٣×١٠^{٩} و . ا . س . للتيار . وثمة أوجه شبه بين

التيار الكهربى والماء الجارى . فالقول بأن موصلا يحمل تياراً مقداره ٥ أمبير (٥ كولوم/ث) يقابل قولنا إن ماسورة تحمل ٥ جالونات من الماء فى الثانية .

ولابد هنا من إيضاح الاتجاه الاصطلاحى للتيارى . فيما أننا استخدمنا شحنة اختبار موجبة عند تعريفنا للمجال الكهربى ، فالشحنات الموجبة تسرى من مواقع الجهد المرتفع إلى مواقع الجهد المنخفض ، وبعبارة أخرى من الموجب إلى السالب . هذا الاتجاه هو اتجاه مرور الشحنة الذى اصطلح عليه فى التيار الكهربى . ولكن الواقع فى الموصلات الفلزية أن الشحنات الموجبة لا تنتقل من أماكنها ، وإنما تتحرك بدلا منها الإلكترونات الحرة ، فتسير من الجهد المنخفض إلى الجهد المرتفع بسبب شحنتها السالبة . وعلى ذلك ، فعندما يقال إن التيار يسير من النقطة المرتفعة الجهد (+) إلى نقطة أقل جهداً (—) ، ينبغى أن نتذكر أن الحركة الفعلية للشحنات فى الفلزات إنما هى سريان الإلكترونات فى الاتجاه المضاد .

وتلخيصاً للبند السابق نقول : إن الحصول على تيار يستدعى أن يكون لدينا فرق جهد متاح بين نقطتين يمكن توصيلهما بموصل . وبقى أن نبحث فى كيفية الحصول على فرق جهد ، وفى كيفية الإبقاء عليه .

١٣ ــ ٣ مصادر فرق الجهد :

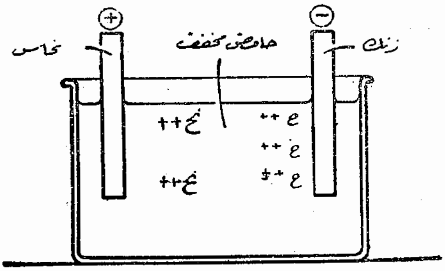
هناك وسائل متعددة نعرفها الآن لاستحداث فرق جهد . ومع أنها لا تتيح إلا فرق جهد صغير نسبيًّا ، إلا أنها تتميز بقدرتها على الاحتفاظ بفرق الجهد ثابتاً لمدة طويلة أثناء مرور التيار . ومن هذه الوسائل اثنتان نخصهما بالذكر لما لهما من الأهمية ، وهما : عمود (أو خلية) فولطا ، الذى يحول الطاقة الكيموية إلى طاقة كهربية ، والمولد الكهربى ، الذى يحول الطاقة الديناميكية إلى طاقة كهربية .

ويطلق اصطلاح خاص على فرق الجهد الذى تتيحه هذه المصادر ، ألا وهو القوة الدافعة الكهربية للمصدر (واختصارها ق . د . ك .) وتعرف القوة الدافعة الكهربية لأى مصدر بأقصى فرق جهد يحتفظ به المصدر . ومما يجدر بالملاحظة

أن هذا الاصطلاح لا يخلو من المغالطة — فالمسمى ليس قوة ، ولكنه فرق جهد (أى شغل لوحدة الشحنة) . ووحداته هى نفسها وحدات فرق الجهد، أى و. ا . س. لفرق الجهد ، أو الفولت إذا استعملنا الوحدات المطلقة . وسنتطرق الآن لبحث مكونات عمود فولطا وكيفية توليده للقوة الدافعة الكهربية .

١٣ — ٤ عمود فولطا :

كان « جلفانى » سنة ١٧٨٦ الفضل فى اكتشاف أن الطاقة الكيموية يمكن تحويلها إلى طاقة شحنات متحركة ، وقد نما هذا الكشف وتطور على يدى « فولطا » . ولدينا الآن أنواع عديدة من الأعمدة الكهربية ، تختلف من البطارية الجافة المشهورة المستعملة فى أجهزة الراديو المتنقلة إلى عمود التخزين (أو المركم) المستعمل فى السيارات . ولكى نتحاشى الإغراق فى الكيمياء المعقدة الداخلة فى الأعمدة الشائعة ، سيقتصر شرحنا على مبدأ عمل العمود البسيط الذى هو أول واحد من نوعه ، ألا وهو عمود النحاس والزنك والحامض (شكل ١٣ — ١) .



(شكل ١٣ — ١)

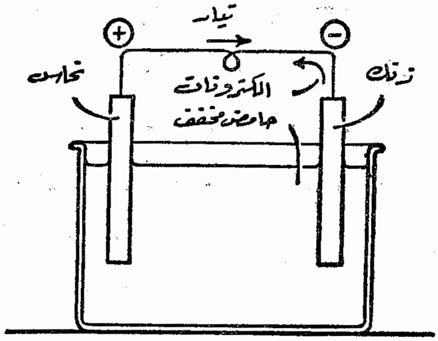
إذا غمر لوحان من النحاس والزنك (الخارصين) فى محلول مخفف لحامض ، يلاحظ أن كلا من النحاس والزنك يميل إلى الذوبان ببطء فى المحلول. وتحدث ظاهرتان هامتان . فعندما تترك ذرات النحاس لوح النحاس لتدخل فى السائل فهى تفعل ذلك كأيون موجب، فتخلف وراءها الكترونين على اللوح. ويتبع ذلك أن لوح النحاس يكتسب شحنتين سالبتين نظير كل ذرة من ذرات النحاس تذهب إلى المحلول ، ويكتسب المحلول فى الوقت نفسه شحنتين موجبتين هما ما يحمله أيون النحاس . وبذا يصبح جهد لوح النحاس أقل من جهد السائل المحيط به . ويحدث الشىء نفسه عند لوح الزنك ، فيصبح سالباً بالنسبة للمحلول حوله . غير

أن الزنك يذوب فى المحلول بسهولة أكثر مما يذوب النحاس ، وعليه يصبح لوح الزنك أشد سلبية من لوح النحاس . ولهذا يكون جهد النحاس بالنسبة للسائل أعلى من جهد الزنك بالنسبة للسائل — ومن ثم ينشأ فرق جهد بين نهايتى العمود . ولما كانت معظم الأجسام الصلبة تميل إلى الذوبان لدرجةما فى الأحماض الضعيفة فمستلزمات العمود الفولطائى هى بكل بساطة جسمان مختلفان من الأجسام الصلبة موضوعان فى محلول مخفف لحامض . ويسمى لوحا النحاس والزنك فى العمود الذى شرحناه بالقطبين أو الإلكترودين ، ويعرف أعلاهما جهداً (نح) بالقطب الموجب أو الإلكترود الموجب ، وأقلهما جهداً بالقطب السالب أو الإلكترود . أما المحلول المخفف للحامض فيسمى بالإلكتروليت . وتبلغ القوة الدافعة الكهربية لعمود النحاس والزنك نحو ١ فولط .

والشرح الوافى للتفاعل الكيموى حتى فى هذا العمود البسيط أشد تعقيداً مما أشرنا إليه . ومن المظاهر المعرقلة لاستعمال هذا العمود كمصدر كهربى ، نذكر على وجه التحديد ميل غاز الهيدروجين المنطلق من الإلكتروليت إلى الالتصاق بقطب النحاس ، مؤلفاً عموداً من الهيدروجين والزنك بدلا من عمود النحاس والزنك الذى نريده . وفى الأعمدة الأكثر رقيا تتبع وسائل خاصة لمواجهة مثل هذه العوامل التى تؤدى إلى خفض القوة الدافعة الكهربية للعمود . وإذا غضضنا النظر عن هذه العوامل الدخيلة ، يمكننا أن نرى كيف يحتفظ العمود بفرق جهد . فبمجرد غمر الأقطاب فى الإلكتروليت تأخذ أيونات النحاس وأيونات الزنك فى المرور إلى المحلول حتى تصبح الشحنة السالبة الكبيرة التى يكتسبها كل قطب كافية لمنح مزيد من الأيونات الموجبة من الرحيل . ومن ثم تنشأ حالة توازن ، ويصل جهد كل قطب حينئذ إلى نهايته العظمى . فإذا وصلنا القطبين من الخارج بسلك يمر فائض الالكترونات الموجود على لوح الزنك فى السلك ويكتسب منه لوح النحاس مزيداً من الإلكترونات ، وبمعنى آخر ، يمر تيار (شكل ١٣—٢). بيد أن لوح الزنك يصبح الآن أقل سلبية عما كان ، ولذا يذوب المزيد من الزنك فى المحلول . ومع أن جهد كل قطب قد تغير بالنسبة للسائل . فلا يزال يوجد فرق

جهد بينهما ، ويستمر التيار فى السريان طالما بقى فى العمود زنك .

ولإكمال الصورة ، علينا أن نبحث ما يجرى داخل الإلكتروليت ، مع بعض المغالاة فى تبسيط الناحية الكيموية ، إن أيونات الزنك الموجبة الخارجة من لوح الزنك تكون حوله غلافاً ضخماً يأخذ فى الانتشار أكثر فأكثر داخل العمود برغم وجود غلاف صغير من أيونات النحاس . ومؤدى ذلك هو أن الشحنة الموجبة تنتقل فعلا عبر العمود ، نظير سريان الإلكترونات فى السلك الخارجى . ويلاحظ أنه ، خلافاً لحركة الشحنة فى الموصلات الفلزية ، تتحرك الشحنات الموجبة فعلا فى السوائل الموصلة . ونظراً للمقاومة الكبيرة لهذه الحركة من جانب جزيئات السائل فسرعة المسير لأى أيون بطيئة جداًّ ، ولكن خلاصة الحركة تقدم مطرد للشحنة خلال العمود . وغنى عن البيان أنه لابد من بذل طاقة لنقل هذه الشحنة الموجبة خلال العمود ، وكذلك لتحريك الإلكترونات فى السلك الخارجى . وسنشير إلى ذلك مرة أخرى .

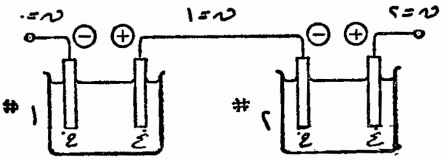


(شكل ١٣ – ٢)

١٣ – ٥ الأعمدة المتصلة على التوالى :

إذا كان السلك الذى يصل النهاية الموجبة والنهاية السالبة لعمود النحاس والزنك موصلا مثاليًّا سرت فيه الإلكترونات بدون عائق على الاطلاق . فى هذه الحالة تستنفد مادة العمود بسرعة كبيرة ويتلاشى فرق الجهد بين طرفى العمود (ويقال إن العمود متصل فى « دائرة مختصرة ») . ولا يمكن بتاتاً أن يوجد فرق جهد دائم بين طرفى موصل كامل ، كما يستدل من معنى اللفظ نفسه . ومع أنه لا يوجد فى المعمل موصل كامل ، فالسلك السميك من النحاس أو الفضة يعتبر إلى حد كبير قريباً من الموصل الكامل . وعليه ، فتوصيل نقطتين بسلك كهذا يلاشى فرق الجهد بينهما فى الحال . وتهيئ لنا هذه الحقيقة فرصة مفيدة لتوصيل

القطب السالب من عمود بالقطب الموجب من عمود آخر بوساطة سلك من النحاس أو الفضة (شكل ١٣ – ٣) . ولن يحدث تفاعل كيموى بين النقطتين المتصلتين بذلك السلك ، لعدم وجود سائل إلكتروليتى بينهما . وبما أن جهد لوح النحاس فى العمود رقم ١ أعلى من جهد لوح الزنك فى العمود نفسه بمقدار فولط واحد، وبما أن التفاعل



(شكل ١٣ – ٣)

الكيموى فى العمود رقم ٢ يرفع جهد قطبه النحاسى بمقدار فولط واحد عن جهد قطب الزنك فيه ، فجهد القطب الموجب للعمود الثانى لابد أن يكون أعلى من القطب السالب للعمود الأول بمقدار ٢ فولط . أى أن القوة الدافعة الكهربية للمجموعة تساوى مجموع القوى الدافعة الكهربية المنفردة . ويقال فى هذه الحالة إن الأعمدةمتصلة على التوالى . فإذا رمزنا بالرمز ق للقوة الدافعة الكهربية ، يمكننا فى حالة الأعمدة المتصلة على التوالى أن نكتب :

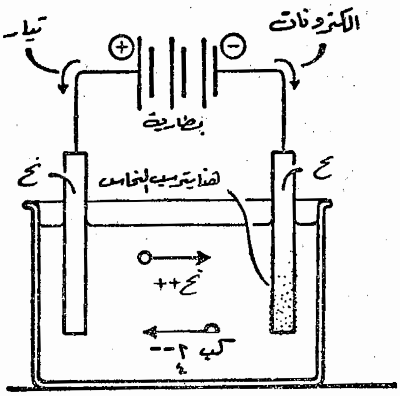
$$ق = ق_{١} + ق_{٢}$$

وجلى أن التيار الذى يمر خلال أحد الأعمدة عند إغلاق الدائرة هو التيار نفسه الذى يمر خلال العمود الآخر ، وإلا لتراكمت الشحنة فى مكان ما فى الدائرة ، وهذا ما يناقض فكرتنا عن عمل العمود . وبتوصيل عدة أعمدة على التوالى تتكون بطارية ، ويمكن الحصول منها على فرق جهد كبير . وتحتوى البطارية الشائعة الاستعمال فى الراديو المتنقل على ثلاثين عموداً ، القوة الدافعة الكهربية لكل منها ١,٥ فولط ، والقوه الدافعة الكهربية الكلية ٤٥ فولطاً .

١٤ – ٦ التيار الكهربى – عدد افوجادرو :

رأينا أن العمود الفولطائى هو وسيلة لتحويل الطاقة الكيموية (الناتجة من التفاعل الكيموى بين الأقطاب والمحلول) إلى طاقة كهربية . وقد وجد أيضاً أن عكس هذا التحويل ممكن ، بمعنى أن الطاقة الكهربية يمكن تحويلها إلى

طاقة كيموية . ولهذه العملية مكانة خاصة فى الفيزياء الذرية ، إذ أنها أساس الطريقة المقبولة لقياس عدد افوجادرو .



(شكل ١٣ – ٤)

لنفرض أننا غمرنا قطبين متشابهين من النحاس فى محلول حامضى لكبريتات النحاس كب ا٤ نح (شكل ١٣ – ٤) . فمن الواضح تماماً ، أن هذا لا يؤلف عموداً فولطائيًّا ، لاستحالة وجود فرق جهد بين قطبين متماثلين . ولكن عند توصيل القطبين بمصدر خارجى لفرق الجهد – أى ببطارية – يحدث انتقال محسوس للنحاس من القطب الموجب للقطب السالب . وانتقال المادة خلال الإلكتروليت من أحد القطبين إلى الآخر تحت تأثير فرق الجهد يسمى بالتحليل الكهربى .

فإذا بالغنا مرة أخرى فى تبسيط الخطوات الكيموية المعقدة التى تحدث فعلا ، أمكننا أن نعلل التحليل الكهربى على النحو التالى . يميل جزىء كبريتات النحاس فى المحلول الحامضى إلى التفكك إلى أيونين ، يتألف أحدهما من ذرة النحاس ناقصة إلكترونين ، ويتألف الآخر مما تبقى من الجزىء ، وهو كب ا٤ ، الذى يحتفظ بالإلكترونين من النحاس ، ويرمز لهذين الأيونين بالرمزين نح++ ، (كب ا٤)-- . ويرتحل هذان الأيونان تحت تأثير المجال الكهربى الواقع عليهما ، فيهاجر أيون نح ++ إلى القطب السالب ، ويهاجر أيون (كب ا٤)-- إلى القطب الموجب ، كما يقضى بذلك قانون كولوم عن التجاذب بين الشحنات المخالفة . وعند القطب (أو الإلكترود) السالب يأخذ نح ++ الإلكترونين اللذين يحتاج إليهما ويترسب على ذلك الإلكترود . وعند الإلكترود الموجب يتخلص (كب ا٤)-- من الإلكترونين الزائدين فيه ، ويتحد أثناء ذلك بذرة نحاس من الإلكترود فيتحول إلى كب ا٤ نح ويذوب فى المحلول . بهذه العملية إذن تتناقص ذرات النحاس من الإلكترود الموجب ، وتترسب فى الوقت نفسه ذرات

نحاس على الإلكترود السالب . وبذلك تبقى كمية كب ا٤ نح فى المحلول بدون تغيير . وعملية الترسيب الكهربى للنحاس على الإلكترود السالب يمكن تكرارها بفلزات أخرى كثيرة إذا اختيرت الإلكتروليتات المناسبة . ومعظم الأدوات المعدنية المطلية الرخيصة تطلى كهربيًّا بهذه الطريقة .

نستخلص من هذه التجربة نتيجة هامة ، إذ يمكننا على ضوئها تقدير عدد « أفوجادرو » (بند ٩ — ٦) — وهذا مثال نموذجى على استخدام الطرق غير المباشرة فى الحصول على معلومات ذرية . ولإيضاح ذلك سنستعير نتائج تجربة سوف نشرحها فى الفصل السابع عشر ، وتستخدم فى تعيين شحنة الإلكترون . والقيمة التى تحددها هذه التجربة لشحنة الإلكترون هى ١٦ × ١٠−٢٠ كولوم (٤و٨ × ١٠−١٠ و . ا . س .) . فعند ترسيب كل ذرة من ذرات النحاس على الإلكترود السالب تأخذ منه إلكترونين تزوده بهما البطارية الخارجية التى تستعيدهما فى النهاية من الإلكترونات المتروكة على الإلكترود الموجب . فإذا سمحنا لعملية التحليل الكهربى أن تستمر مدة تكفى تماماً لترسيب جرام-ذرى واحد من النحاس (أى ٦٣,٦ جم) فعدد الإلكترونات التى يعطيها الإلكرود السالب تساوى تماماً ضعف عدد الذرات فى الجرام الذرى للنحاس ، أى ضعف عدد « أفوجادرو » . ومن الأيسر كثيراً قياس تيار وزمن عن قياس شحنة . ومن تعريف

التيار ى = $\frac{\text{س}}{\text{ن}}$ يمكن حساب الشحنة س = ى ن

وبقسمة هذه الشحنة ش على شحنة الإلكترون ينتج عدد الإلكترونات التى استمدها الجرام الذرى من النحاس المترسب ، أى ضعف عدد« أفوجادرو».

مثال : يترسب ٦٣,٦ جم من النحاس بالتحليل الكهربى بإمرار تيار شدته ١٠ أمبيرات لمدة ٥ ساعات و٢١ دقيقة فى محلول كبريتات النحاس . احسب عدد « افوجادرو »

المعلوم : كتلة النحاس = ٦٣,٦ جم = ١ جرام — ذرى .

ى = ١٠ أمبيرات، ن = ٥ ساعة و٢١ دقيقة = ١٩٢٦٠ ثانية

عدد أفوجادرو ىه = ؟

الحل : جملة الشحنة المعطاة للإلكترود السالب هى

س = ى ز = ١٠ × ١٩٢٦٠ = ١٩٢٦٠٠ كولوم

وبما أن شحنة كل إلكترون هى ١٦ × $١٠^{-٢٠}$ كولوم .

∴ عدد الإلكترونات التى اكتسبها الإلكترود هو $\frac{١٩٢٦٠٠}{١٦ \times ١٠^{-٢٠}}$

أى ١٢٠٤٠ × $١٠^{٢٠}$ = ١٢,٠٤ × $١٠^{٢٣}$ إلكترونا

وكان نصيب كل ذرة إلكترونين . إذن عدد ذرات النحاس فى الجرام الذرى = عدد افوجادرو = ٦,٠٢ × $١٠^{٢٣}$.

١٣ ــ ٧ توصيل الكهربا فى الفلزات :

إذا تعرضت نقطتان فى موصل فلزى لفرق جهد ، فالإلكترونات الحرة الكثيرة الموجودة فى الموصل تقع تحت تأثير هذه القوة . ومن المسلم به أنه بتأثير هذه القوة تتسارع الإلكترونات (أى تتحرك بعجلة) وتكتسب طاقة حركة تأخذ فى التزايد ما لم يكن هناك ما يتصدى لهذه الحركة . ولكن بسبب وجود عدد كبير من الجزيئات التى يتألف منها الموصل ، تحدث فى الواقع تصادمات مرنة بين الإلكترونات والجزيئات ، وينشأ شبه خليط من الإلكترونات والجزيئات فى حالة اتزان ، يختص بكثير من خصائص الغازات . وليس التيار الإلكترونى إلا انسياقاً بطيئاً للإلكترونات فى المجال الكهربى الناتج من فرق الجهد . ونظراً للتصادمات المتتالية فمتوسط طاقة حركة الإلكترونات واحدة على امتداد الموصل . ومما يجدر بالذكر أنه بالرغم من بطء حركة الإلكترون فعلا خلال الموصل فالطاقة تنتشر بسرعة ــ وذلك لأن الحركة الأمامية للإلكترونات تبدأ بسرعة ، إذ أن كل الإلكترونات الحرة فى الموصل ستجد نفسها فى المجال نفسه . وعلى سبيل المقارنة ، إذا فتحنا صماماً فى ماسورة مياه ينبثق الماء فى الحال ، مع أن مرور جزئ الماء من المضخة إلى

الصمام قد يستغرق دقائق ، بل ساعات .

ووصفنا السابق لمرور التيار ينطبق تماماً على التوصيل الكهربي فى السوائل ، إذا راعينا فى هذه الحالة أن الحركة تتعلق بالأيونات الموجبة والأيونات السالبة بدلا من الإلكترونات ، وأحياناً بالإضافة إليها .

١٣ — ٨ المقاومة الكهربية :

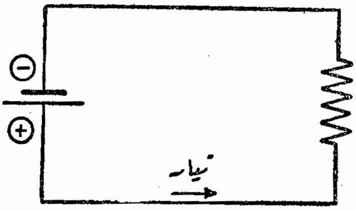
فى أى موصل غير مثالى توجد معارضة لمرور التيار . ومن الأهمية بمكان أن نحصل على مقياس كمى لهذه المعارضة . إذا ارتفع فرق الجهد ف بين طرفى موصل معين ، فالصورة التى رسمناها فى أذهاننا للتوصيل الفلزى توحى بأن المعارضة لمرور التيار ينبغى أن يكون التغلب عليها أكثر سهولة ، وبالتالى ينبغى أن يزداد التيار . (إذا ارتفع ضغط المضخة ينبغى أن نتوقع تدفقاً أكبر) . نرى من ذلك أن المعيار المعقول لهذه المعارضة هو فوق الجهد لوحدة التيار . وتسمى هذه الكمية بالمقاومة . وتعريفها بالرموز هو :

$$\text{م} = \frac{\text{ف}}{\text{ى}}$$

ووحدتها العملية هى الفولط / أمبير ، وتسمى بالأوم . والأوم يساوى $\frac{1}{9} \times 10^{-11}$ و.ا.س . للمقاومة . ولما كانت المقاومة لمرور التيار تتوقف على الخواص الجزيئية للموصل . فبديهى من ميكانية التوصيل أن م تتوقف على عدة عوامل :
(ا) فمقاومة الموصلات تتوقف على طبيعة المادة . وحتى العناصر الفلزية النقية قد تختلف مقاومتها النوعية بعامل يزيد عن ٥٠ (ب) وتتناسب مقاومة أى موصل معين تناسباً طردياً مع طوله . (حـ) ، كما تتناسب تناسباً عكسياً مع مساحة مقطعه . (ء) وتزداد مقاومة الموصلات الفلزية بارتفاع درجة الحرارة . إلا أن مقاومة أى موصل معين تبقى ثابتة متى بقيت درجة حرارته ثابتة . ومعنى ذلك أن ازدياد فرق الجهد إلى ثلاثة أمثاله ، يؤدى إلى ارتفاع التيار إلى ثلاثة أضعافه ، وإنقاص فرق الجهد إلى النصف يؤدى إلى خفض التيار إلى النصف ، وهلم جرا . وكان جيورج

أوم (Georg Ohm) أول من لاحظ هذه العلاقة ، فسميت بقانون أوم . وينطبق هذا القانون على الموصلات الفلزية ، ولكنه لا يسرى على السوائل أو الغازات .

ومع أن كافة الموصلات لها مقاومة ، فمقاومة الأسلاك السميكة من النحاس تبلغ من الصغر عادة بحيث يمكن إهمالها عند ما تستعمل فى التوصيلات الكهربية وعلى عكس ذلك ، فالأسلاك الطويلة الرفيعة من الحديد والنيكل وعدد من السبائك لهامقاومة كبيرة نسبيًّا ، ولهذا تستخدم (عادة) بشكل ملفات ملفوفة على (إطارات صغيرة) لتزويد الدوائر الكهربية عن قصد بمقاومة كبيرة .



(شكل ١٣ – ٥)

وتمثل الأشكال التوضيحية الموصلات التى لها مقاومة برمز يشابه سن المنشار. أما أسلاك التوصيل المهملة المقاومة فتمثل بخطوط مستقيمة . ورمز البطارية أو العمود وفقاً لهذا النظام هو خطان متوازيان ، أحدهما قصير ويمثل القطب السالب، والآخر طويل ويمثل القطب الموجب . ويرى فى شكل ١٣ — ٥ رسم توضيحى لدائرة بسيطة تحتوى على بطارية وأسلاك توصيل ومقاومة .

١٣ — ٩ الطاقة الكهربية :

بحكم وجود مقاومة لسريان الشحنة خلال موصل ، يحتاج مرور التيار إلى طاقة . وبما أن الإلكترونات المتحركة لا تكتسب فى المتوسط طاقة حركة من المجال الكهربى بسبب تصادمها مع جزيئات الموصل ، فالطاقة المبذولة لإمرار التيار لا تستنفد إلا فى زيادة طاقة حركة الجزيئات ، أى أن الموصل يسخن بوساطة التيار . ويمكن بسهولة حساب مقدار الشغل اللازم لإمرار تيار . فمن تعريف فرق الجهد .

$$\text{ف} = \frac{\text{ش}}{\text{س}} \qquad \therefore \text{ش} = \text{ف س}$$

$$\text{ولكن} \quad \text{ى} = \frac{\text{س}}{\text{ز}} \qquad \therefore \text{ش} = \text{ف ى ز}$$

وإذن فالشغل المبذول هو حاصل ضرب فرق الجهد عبر الموصل ، وتيار الموصل ، والزمن الذى مر فيه التيار . وإذا استعملنا نظام الوحدات العملية فعبرنا عن ف بالفولط ، ى بالأمبير ، ن بالثوانى ينتج الشغل ش بالچول. ويمكن وضع الصيغة الخاصة بالشغل على النحو التالى بدلالة مقاومة الموصل . فبما أن

$$م = \frac{ف}{ى} \qquad \therefore\ ش = ف\ ى\ ن = (م\ ى)\ ى\ ن$$

أى أن

$$ش = ى^{٢}\ م\ ن$$

وتظهر هذه الطاقة دائماً كحرارة فى الموصل

ويمكن استنتاج القدره من تعريفها :

$$د = \frac{ش}{ن} = \frac{ف\ ى\ ن}{ن} = ف\ ى \qquad \text{واط (چول/ث)}$$

وبصيغة أخرى :

$$د = \frac{ش}{ن} = \frac{ى^{٢}\ م\ ن}{ن} = ى^{٢}\ م \qquad \text{واط}$$

ومن التعريف :

١ واط = ١ چول / ث

∴ ١ واط . ثانية = ١ چول

وقد جرت العادة فى الصناعة الكهربية أن يستعمل الواط .ثانية عوضاً عن الچول فى قياس الطاقة الكهربية . والوحدتان متكافئتان . أما استهلاك الطاقة على نطاق واسع فيقاس بدلالة الكيلو واط . ساعة . ومن المفهوم أن :

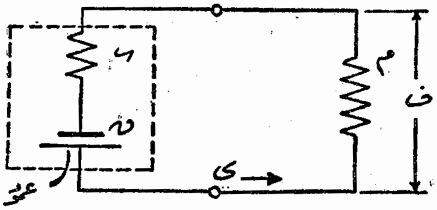
١ كيلواط . ساعة = ١٠٠٠ واط . ساعة = ١٠٠٠ × ٣٦٠٠ واط . ثانية

$= ٣{,}٦ \times ١٠^{٦}$ واط ثانية $= ٣{,}٦ \times ١٠^{٦}$ چول .

١٣ — ١٠ طاقة العمود الفولطائى :

أشرنا فى بند ١٣ — ٤ إلى أن العمود الفولطائى يبذل شغلاً لا فى إمرار تيار

خارجى فحسب ، بل كذلك فى نقل الشحنات داخل السائل الإلكتروليتى من أحد القطبين إلى الآخر . ويواجه التوصيل داخل العمود بمقاومة تسمى المقاومة



(شكل ١٣ – ٦)

الداخلية للعمود ، ويرمز لها بالرمز ب . وعند مرور تيار ى من العمود ، فإن فرق الجهد اللازم لدفع ذلك التيار ضد المقاومة الداخلية ، أى هبوط الجهد الداخلى للعمود ، هو ى ب . نرى من ذلك أن القوة الدافعة الكهربية تزود الدائرة (شكل ١٣ – ٦) بفرق جهد خارجى ف ، وفرق جهد داخلى ى ب .

ق = ف + ى ب

= ى م + ى ب

حيث م المقاومة فى الدائرة الخارجية كلها . وينتج عن ذلك أن الطاقة المستمدة من العمود هى :

ش = ى^2 م ز + ى^2 ب ز

وبديهى أن الشغل الداخلى المبذول ، وهو ى^{2}ب ز ، غير متاح للدائرة الخارجية ، وهو يتبدد كحرارة داخل العمود . ولكى نجعل هذه الطاقة المتبددة أقل مايمكن، ينبغى أن نجعل المقاومة الداخلية ب أقل ما يمكن . وكلما قدم العهد بالعمود تزداد مقاومته الداخلية بسبب التغيرات الكيموية التى تحدث فيه ، ولذا تقل فائدته . ويسمى غالباً فرق الجهد ف المتاح للدائرة بفرق جهد النهايتين ، وهو دائماً أقل من القوة الدافعة الكهربية للعمود بمقدار الهبوط الداخلى ى ب .

١٣ – ١١ مسائل على الدوائر الكهربية :

مثال ١ : القوة الدافعة الكهربية لعمود ٢ (فولط) ومقاومته الداخلية ٠,١ أوم (شكل ١٣ – ٧) . ما هو التيار الذى يمكن أن يمر منه فى دائرة خارجية

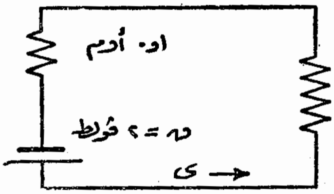
مقاومتها ٣,٠ أوم ؟

المعلوم : ق = ٢ فولط ، ب = ١,٠ أوم ، م = ٣,٠ أوم ى = ؟

الحل : ق = ف + ى ب = ى م + ى ب

∴ ٢ = ى × ٣,٠ + ى × ١,٠ = ٤,٠ ى

∴ ى = ٥ أمبير وهو الجواب المطلوب



(شكل ١٣ – ٧)

بسبب المقاومة الداخلية يحدث فى العمود هبوط داخلى مقداره ى ب = ٥ × ١,٠ = ٥,٠ فولط . ومع أن القوة الدافعة الكهربية للعمود ٢ فولط ، إلا أن فرق جهد النهايتين هو ٢ – ٥,٠ = ١,٥ فولط فقط . ويمكننا أن نحسب توزيع القدرة المستنفذة فى الدائرة كما يلى :

القدرة الخارجية = ى^{٢} م = ٥^{٢} × ٣,٠ = ٧,٥ واط

القدرة الداخلية = ى^{٢} ب = ٥^{٢} × ١,٠ = ٢,٥ واط

القدرة الكلية = ٧,٥ + ٢,٥ = ١٠ واط

القدره الكلية أيضاً بالحساب المباشر = ق ى = ٢ × ٥ = ١٠ واط .

ويلاحظ أن ربع القدرة التى تولدها البطارية تضيع داخلها .

مثال ٢ : ما هو التيار المار فى مصباح كهربى قدره ١٠٠ واط متصل بمصدر منزلى جهده ١١٠ فولط ؟ وما مقاومة المصباح .

المعلوم : القدرة د = ١٠٠ واط ، ف ١٠٠ فولط

ى = ؟ ، م = ؟

الحل : د = ف ى ∴ ١٠٠ = ١١٠ ى

∴ ى = ٩,٠ أمبير وهو أحد الجوابين

م = $\frac{ف}{ى}$ = $\frac{١١٠}{٩,٠}$ = ١٢١ أوم وهو الجواب الثانى

مثال ٣ : بفرض أن شحنة الإلكترون ١٦ × ١٠$^{-٢٠}$ كوولم ، احسب عدد الإلكترونات التى تمر فى ١٠ دقائق فى فتيل المصباح السابق ذكره فى المثال ٢

المعلوم : ى = ٠,٩ أمبير ، شحنة الإلكترون = ١٦ × ١٠$^{-٢٠}$ كولوم

عدد الإلكترونات = ؟ ، الزمن ن = ١٠ دقائق

ن = ١٠ × ٦٠ ثانية

الحل : ى = $\frac{س}{ن}$ ∴ س = ى ن = ٠,٩ × ١٠ × ٦٠

= ٥٤٠ كولوم

عدد الإلكترونات = $\frac{٥٤٠}{١٦ \times ١٠^{-٢٠}}$

= ٣٣,٧ × ١٠^{٢٠} إلكتروناً وهو المطلوب

وبتعبير آخر ، فى كل ثانية يضيئها مصباح كهربى قدرته ١٠٠ واط يمر خلال الفتيل نحو ٦ ملايين ملايين ملايين إلكترون . إن شحنة الإلكترون هى فى الواقع صغيرة جداً .

تمارين

١ — مصباح كهربى يسحب تياراً شدته ٢ أمبير . ما مقدار الشحنة المارة فى الثانية ؟ وما عدد الإلكترونات المارة فى الثانية ؟

الجواب : ٢ كولوم/ث أو ١٢٥ × ١٠^{١٧} إلكترون/ث

٢ — ما مقدار النحاس الذى يترسب فى فلطامتر (جهاز تحليل كهربى) إذا مر فيه تيار شدته ٥ أمبير لمدة ساعتين ؟

الجواب : ١١,٩ جم

٣ — لوحظ فى فلطامتر (خلية تحليل كهربى) فضى أن مرور تيار شدته ٣ أمبير لمدة ٤ ساعات و ٢٠ دقيقة يرسب ٥٢,٣ جم من الفضة. فإذا علم أن الفضة أحادية التكافؤ (أى تفقد أو تكتسب إلكترونا واحداً) فأوجد كتلتها

الذرية .

الجواب : ١٠٧,٩

٤ — يمر تيار كهربى شدته ٠,٤ أمبير فى مصباح كهربى معين إذا وصل طرفاه بفرق جهد قدره ٣٠ فولطاً . ولكن عند توصيله بمصدر جهده ١٠٠ فولط يمر فيه تيار شدته ١ أمبير . أوجد المقاومة فى كل حالة وعلل تغييرها .

٥ — ما قيمة التيار الذى تسحبه مشواة كهربية قدرتها ٦٠٠ واط إذا وصلت بمصدر جهده ١١٠ فولط ؟ وما مقاومتها ؟

الجواب : ٥,٤٥ أمبير ، ٢٠,١ أوم

٦ — يمر تيار شدته ١٠ أمبيرات فى ملف مقاومته ٥٠ أوم لمدة ساعة واحدة . ما مقدار الطاقة التى تتحول إلى حرارة ؟ وما هى القدرة اللازمة ؟

الجواب : ١٨ × ١٠^٦ جول أو ٥ كيلواط ساعة ، ٥ كيلواط

٧ — ما مقدار الطاقة التى يكتسبها إلكترون (شحنته ١٦ × ١٠^-٢٠ كولوم) إذا تحرك بحرية خلال فرق جهد مقداره ١ فولطاً .

الجواب : ١٦ × ١٠^-١٣ أرج

٨ — القوة الدافعة الكهربية لبطارية من الأعمدة ٢٠ فولطاً ، والمقاومة الداخلية الكلية ٢ أوم . فإذا وصل طرفاها بملف مقاومته ١٠ أوم فما قيمة التيار المار ؟ وما هو فرق الجهد عند نهايتى البطارية ؟ وما مقدار هبوط الجهد الداخلى ؟

الجواب : ١,٦٧ أمبير ، ١٦,٧ فولط ، ٣,٣ فولط

مراجع مقترحة للاطلاع

Magie, W. F., "Source Book in Physics," New York, McGraw-Hill Book Co., 1935.

فى صفحة ٤٢٧ وصف لأول بطارية كهربية (فولطا سنة ١٨٠٠) .

وفى صفحة ٤٦٥ اكتشاف أوم لقانون التوصيل الفلزى سنة ١٨٢٦ .

وفى صفحة ٤٩٢ اكتشاف فاراداى لقانونى التحليل الكهربى .

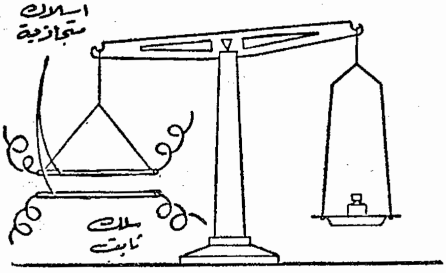
الفصل الرابع عشر

المجال المغنطيسى

١٤ ــ ١ القوة بين تيارين :

بحثنا فى الفصل السابق مستلزمات إنتاج التيار الكهربى وعملية التوصيل. وأصبح من المناسب الآن أن نبحث فى تأثيرات التيار (خلاف الحرارة المتولدة فى موصل). وتطور الكهربا حافل، أكثر من غيره من فروع الفيزياء، بكشوف جاء بعضها عرضاً، وجاء بعضها الآخر نتيجة لتجارب مرسومة. ولكى نعرض تطور الموضوع عرضاً منطقيًّا، سنسبق التسلسل التاريخى. ونستعير من أحداث القرن العشرين والقرن التاسع عشر والقرن الثامن عشر ما نراه مناسباً للمقام. ولهذا سنتحاشى ذكر الكثير من الآراء الباطلة التى كانت معتنقة عن الكهربا، وسنصوغ مناقشتنا عوضاً عن ذلك فى إطار الصورة التى نعتقد اليوم أنها صحيحة.

وسنشرح فيما يلى بضع تجارب بسيطة تكشف لنا عن خاصية من أهم خصائص التيار الكهربى، ألا وهى مجاله المغنطيسى. لنفرض أننا علقنا من أحدى ذراعى ميزان حساس سلكاً مستقيما أفقيًّا يمر فيه تيار. ولنفرض أننا ثبتنا تحت هذا السلك، وعلى مقربة منه سلكاً آخر موازيا للسلك الأول ويمر فيه تيار كذلك (شكل ١٤ــ١).



(شكل ١٤ ــ ١)

وعلينا أن نجعل التوصيلات المؤدية إلى السلك العاوى مرنة ومهيأة بحيث لا تمنع حرية حركته. فإذا كان التياران يمران فى الاتجاه نفسه، فى السلكين، فسوف نلاحظ أن السلكين يتجاذبان ــ كما يمكننا أن نحكم من ميل الميزان. وإذا كان التياران يمران فى اتجاهين متضادين، فإن السلكين يتنافران. نستنتج من

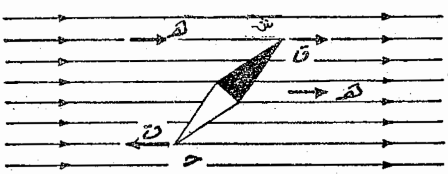
ذلك وجود قوة بين التيارات الكهربية ، أو بعبارة أخرى ، التيارات الكهربية تؤثر فى بعضها البعض تأثيراً متبادلا . ويمكن تكرار التجربة فى الفراغ دون أن تتغير النتيجة . وإذا حاولنا تحطيم القوة المتبادلة باعتراض طريقهما بشريحة رقيقة من مادة توضع بين السلكين ، فلن يكون لهذه المحاولة جدوى ، إلا إذا جربنا شريحة من الحديد . فالقوة المتبادلة تكاد تزول تماماً عند وجود الحديد بين السلكين . ولو غيرنا مقدار التيار فى أحد السلكين تتغير القوة ، فتزداد بازدياد التيار . وإذا قطع التيار فى أحد السلكين تختفى القوة تماماً .

وقد يبدو لأول وهلة ، أن ما نراه من هذه التجارب ليس إلا مظهراً من مظاهر التجاذب أو التنافر الإلكتروستاتيكى . ولكن هناك اعتباران يدعوان إلى نبذ هذا الاحتمال . أولهما أن شحنة الموصل لا تزداد بامرار تيار فيه ، إذ أن عدد الالكترونات الداخلة فى النهاية الموجبة من البطارية يساوى عدد الإلكترونات الخارجة من النهاية السالبة . وليس مرور التيار إلا حركة الإلكترونات الموجودة فعلا ، وشحنة السلك ليست أزيد من شحنته عند استبعاد البطارية . وعليه فالمسألة ليست مسألة شحنة على الأسلاك . وفى أية حالة يمكن أن نجعل القوة المتبادلة إما تجاذباً وإما تنافراً إذا اخترنا للتيار الاتجاه المناسب ، هذا فى حين أن القوة الإلكتروستاتيكية بين الشحنات المتشابهة هى قوة تنافر . ومن ذلك يظهر أن الموضوع لا يمت بصلة إلى المجالات الإلكتروستاتيكية .

ويأتى الاعتبار ، وهو أننا إذا تأملنا النتيجة الثانية للتجربة — وهى أن الحديد من بين سائر المواد هو وحده الفعال فى تغيير القوة المتبادلة — لأدى بنا ذلك إلى طريق جديد للتفكير . فالمعلوم من خبرتنا العادية أن قطعتين من الحديد الممغنط قد تتجاذبان أو تتنافران ، تبعاً لاتجاه إحداهما بالنسبة للأخرى . وقد عرف بالفعل منذ القرن الثالث عشر أن إبرة البوصلة تتجه نحو الشمال والجنوب ، لأنها تنجذب بوساطة الأرض التى تعمل كمغنطيس كبير هو نفسه متجه نحو الشمال والجنوب . وبناء على ذلك ، دعنا نضع إبرة مغنطيسية صغيرة مكان أحد السلكين ، لندرس ما إذا كان هناك تشابه فى القوة بين المغنطيسات والقوة بين التيارات . وسوف نجد إذا أجرينا هذه العملية البسيطة — أن هناك تأثيراً ، إذ أن الإبرة المغنطيسية تستقر فى وضع عمودى على اتجاه السلك الذى يحمل التيار .

١٤ ــ ٢ المجال المغنطيسى حول تيار :

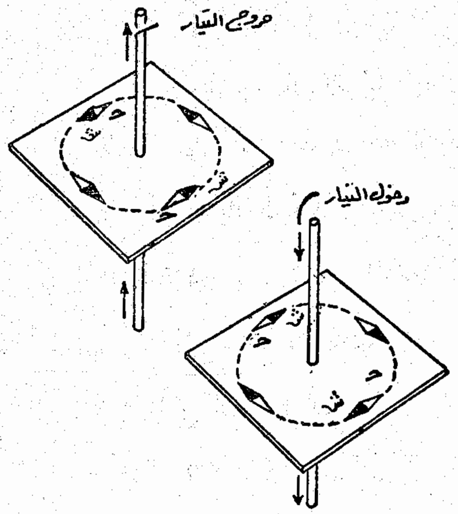
من الحقائق المشهورة أن أحد طرفى الإبرة المغنطيسية (أو القضيب المغنطيسى) يشير دائماً نحو الشمال الجغرافى تقريباً ، والطرف الآخر يشير نحو الجنوب . وللتمييز بين الطرفين ، سمى الطرف المتجه نحو الشمال بالقطب المغنطيسى الشمالى ، والطرف المتجه نحو الجنوب بالقطب المغنطيسى الجنوبى . فإذا تذكرنا ذلك ، يمكننا أن نعرف المجال المغنطيسى . وتسمى المنطقة التى يعانى فيها أى مغنطيس قوة بالمجال المغنطيسى . أما اتجاه المجال المغنطيسى فهو اتجاه القوة المؤثرة على قطب مغنطيسى شمالى . (ولا يخفى أن هذا التعريف مشابه لتعريف المجال الكهربى بوصفه قوة تؤثر على شحنة موجبة) . ويرمز للمجال المغنطيسى بالرمز ه . ويعرف خط القوة المغنطيسى بذلك الخط الذى يعين اتجاهه عند أية نقطة فى الفراغ اتجاه القوة المؤثرة على قطب شمالى . ويبين شكل ١٤ ــ ٢ لماذا تتخذ إبرة البوصلة اتجاه المجال المغنطيسى . فالقوتان المؤثرتان على القطب الشمالى والقطب الجنوبى للإبرة متوازيتان ، ولكنهما متضادتان فى الاتجاه . وطالما كانت الإبرة منحرفة عن اتجاه المجال ه تميل هاتان القوتان لإحداث دوران فيها إلى أن تصبح موازية للمجال . وفى هذا الوضع الأخير لا يترتب على القوى المغنطيسية إلا شد فى الإبرة . ويلاحظ أنه عند ما تتهيأ الإبرة فى اتجاه المجال يكون الخط الواصل من قطبها الشمالى ش إلى قطبها الجنوبى ح متجهاً فى اتجاه ه .



(شكل ١٤ – ٢)

وبالاستعانة بالمعلومات السالفة ، يمكننا أن نرسم خطوط القوة المغنطيسية حول تيار . ولا يحتاج الأمر إلا إلى بوصلة صغيرة . وسوف يحدد قطبها الشمالى اتجاه خط القوة . ونتيجة هذا الرسم مبينة فى شكل ١٤ ــ ٣ ، ومنه تتضح خاصتان هامتان هما :

١ ــ أن خطوط القوة المغنطيسية دوائر متحدة المركز تقع فى مستوى عمودى على التيار .



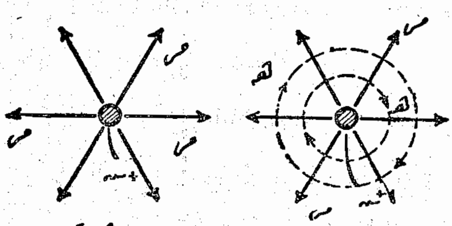
(شكل ١٤ ــ ٣)

٢ ــ أن اتجاه المجال المغنطيسى يكون فى اتجاه عقارب الساعة إذا كان التيار يبتعد عن الراصد ، ويكون فى عكس اتجاه عقارب الساعة إذا كان التيار يقترب من الراصد .

ويمكننا أن نتذكر بسهولة هذه المشاهدة الأخيرة بالاستعانة بقاعدة إبهام اليد اليمنى ، وهى : إذا بسط إبهام اليد اليمنى ليشير إلى اتجاه التيار ، فالاتجاه الذى تنثنى فيه الأصابع الأخرى هو اتجاه المجال المغنطيسى .

١٤ ــ ٣ المجالات المغنطيسية والمجالات الكهربية :

إنه لأمر جوهرى أن نميز تمييزاً واضحاً بين المجال المغنطيسى ﻫ ، والمجال الكهربى (انظر شكل ١٤ ــ ٤) .



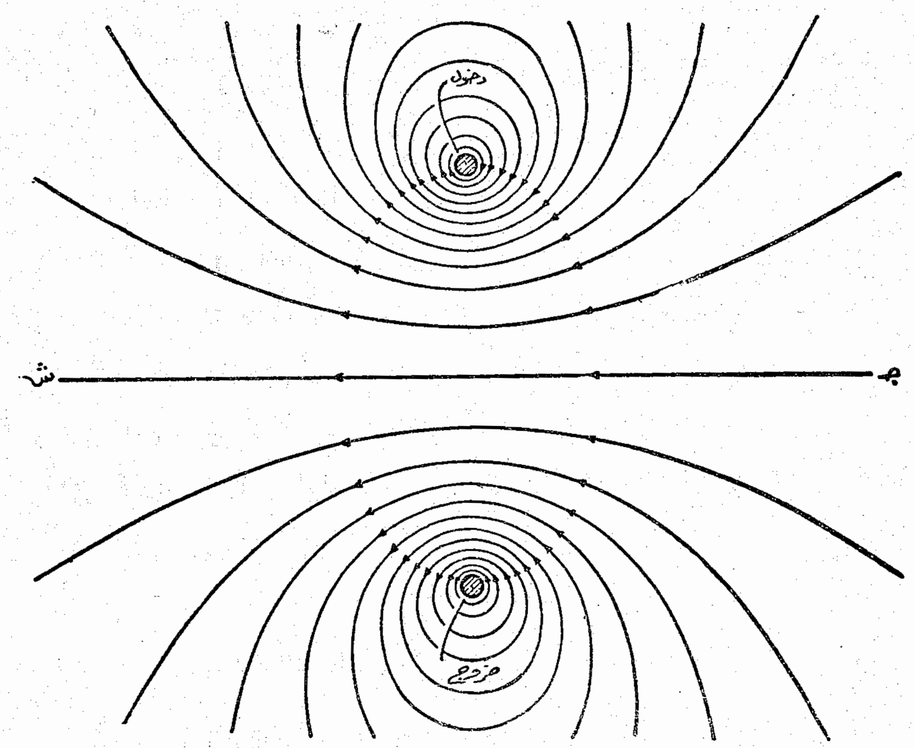
(شكل ١٤ ــ ٤)

فالمجال الكهربى يتولد من كل شحنة ، سواء كانت ساكنة أو متحركة . فإذا كانت الشحنة بشكل نقطة (أو بشكل كرة موصلة صغيرة) فخطوط القوة الكهربية قطرية ، وتدخل فيها أو تخرج منها فى كل الاتجاهات فى الفضاء : فتكون صوب الخارج إذا كانت الشحنة موجبة ، وصوب الداخل إذا كانت سالبة . ولا يتولد مجال مغنطيسى من الشحنة ما لم تكن متحركة ، وتكون خطوط القوة المغنطيسية فى هذه الحالة دوائر متحدة المركز تقع

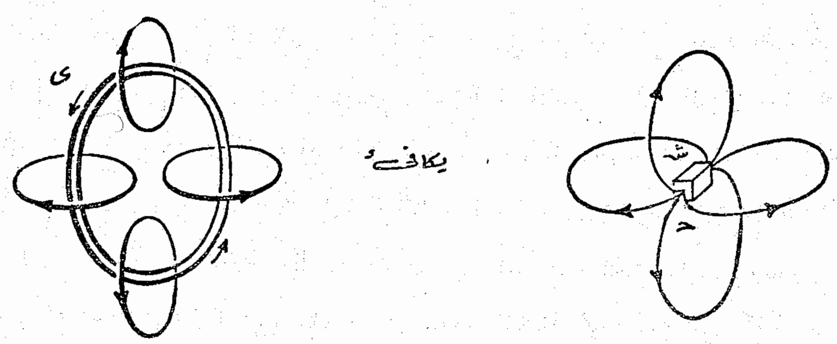
فى مستوى عمودى على اتجاه الحركة . أما اتجاهها فيقرره اتجاه القوة المؤثرة على قطب شمالى لمغنطيس . وفى حين أن المجالات المغنطيسية تصاحب التيارات ، فالمجالات الكهربية تلازم الشحنات ، سواء كانت فى حالة سكون أو فى حالة حركة ونحن لم نحاول ، ولن نحاول ، تفسير سبب هذه المجالات أكثر مما فسرنا كنه الشحنة نفسها . وفى الواقع يمكننا أن نعتنق الرأى القائل بأن هذه المجالات تزودنا بوصف شامل للشحنة ، ففكرة المجالات هى الأكثر أصالة وأهمية . . بمعنى أن الشحنة بموجب ذلك هى أى شىء تظهر له الخواص المجالية المذكورة . وأيا كانت الطريقة التى نتخير أن نحسم بها هذه المسألة ، فالنتيجة التى تجابهنا هى أن الشحنة الكهربية يرافقها مجالان أساسيان . وسنعود إلى تأكيد أهمية هذين المجالين خلال معظم ما تبقى من هذا الكتاب .

١٤ — ٤ التيارات الدائرية — الملف اللولبى :

إذا ثنى السلك الذى يمر فيه التيار الكهربى (بند ١٤ — ٢) على شكل حلقة دائرية ، يأخذ مجاله المغنطيسى التوزيع المتماثل الجديد المبين فى شكل ١٤ — ٥ ، وبتطبيق قاعدة إبهام اليد اليمنى يمكننا أن نتحقق من أن كل خطوط القوة تنفذ داخل الحلقة من أحد وجهيها ، وتخرج من الوجه الآخر . وثنى السلك إلى حلقة يولد مجالا كبيراً عند المركز ، إذ تتضافر كل أجزاء السلك فى توليد ذلك المجال ، ومن المعلوم أنه بتجربة بسيطة يمكننا إثبات أننا إذا قربنا بوصلتين أو قضيبين مغنطيسيين أحدهما من الآخر ، فالقطب الشمالى لأحدهما ينجذب نحو القطب الجنوبى للآخر . وعليه ، فوجه الدائرة الذى ينجذب نحوه القطب الشمالى للبوصلة يعمل كما لو كان قطباً جنوبياً لمغنطيس ، وبما أن قطب البوصلة يتنافر مع الوجه الثانى للحلقة الحاملة للتيار ، فهذا الوجه يعمل بمثابة قطب شمالى . ويتبع ذلك أن التيار الدائرى يعمل عند المركز كمنغطيس قصير (شكل ١٤ — ٦) . ووجه الملف الذى تدخل منه خطوط القوة هو القطب الجنوبى . . (أى أن القطب الشمالى لقطب البوصلة يتجه نحوه) . أما وجه الملف الذى تخرج منه خطوط القوة فهو القطب



(شكل ١٤ — ٥)

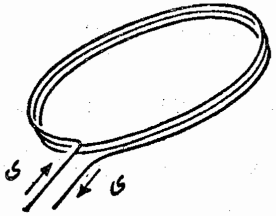


(شكل ١٤ — ٦)

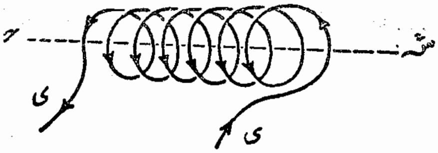
الشمالى (القطب الجنوبى للبوصلة يشير نحوه) . وغنى عن البيان أن انعكاس اتجاه التيار فى الحلقة يؤدى إلى انعكاس اتجاه خطوط القوة .

لقد رأينا أن ثنى السلك الناقل للتيار بصورة حلقة يولد مجالا مغنطيسيًّا كبيراً عند المركز . ويوحى ذلك بأن ترتيب عدد من مثل هذه الحلقات يضاعف

المجال مراراً. ويمكن لف سلك طويل ليتخذ شكل ملف يشابه الحلقة هندسيًّا ولكنه يحتوى على عدة لفات متحدة المركز (شكل ١٤ — ٧) . وجلى أن كل لفة تعمل فى هذه الحالة كحلقة واحدة . ولما كانت كل لفة تحمل التيار نفسه ، فالمجال المغنطيسى عند المركز يساوى عدد اللفات مضروباً فى مجال اللفة الواحدة . كما يمكن أيضاً عمل الملف بترتيب آخر ، وذلك بلف السلك لفًّا لولبيًّا على قالب أسطوانى فتقع اللفات على التوالى جنباً إلى جنب . ويسمى الملف فى هذه الحالة بالملف اللولبى (شكل ١٤ — ٨) وحيث إن التيار فى كل لفة



(شكل ١٤ — ٧)



(شكل ١٤ — ٨)

يوازى التيار فى اللفات الأخرى ، فكل منها يضيف إلى المجال المغنطيسى ويمده فى اتجاه المحور فيملأ كل الحيز داخل الملف . وقد سبق أن ذكرنا أن طرف الملف الذى تدخل فيه خطوط القوة هو قطب جنوبى ، والطرف الثانى الذى تخرج منه هو قطب شمالى . فهذا الملف إذن يكافئ القضيب المغنطيسى المعتاد . وإذا أدنينا ملفين من هذا النوع (يحمل كل منهما تياراً بطبيعة الحال) بحيث تتقارب الأطراف ، فسوف يتأثران بقوة متبادلة بالكيفية نفسها التى يتأثر بها مغنطيسان إذا قرب أحدهما من الآخر .

وخطوط القوة المغنطيسية المحيطة بالتيارات الكهربية تكون دائماً متصلة . وما تسميتنا لأحد وجهى الحلقة أو الملف بالقطب الشمالى أو القطب الجنوبى إلا وسيلة لوصف منطقة يتركز فيها مجال له اتجاه معين (إلى الخارج فى حالة القطب الشمالى ، وإلى الداخل فى حالة القطب الجنوبى) . واتصال خطوط القوة يستلزم وجود قطبين للتيار الحلقى ، وذلك لوجود وجهين للحلقة يظهر التيار منهما أنه يسير

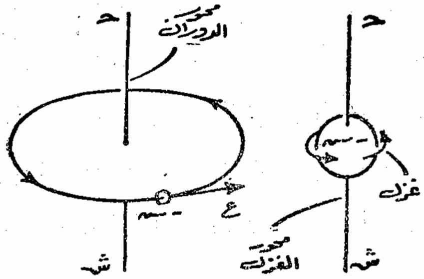
فى اتجاهين متضادين . وينطبق هذا أيضاً ، على المغنطيسات الحديدية حيث يستحيل وجود قطب مفرد فيها . وخلاصة ما سبق أن الأقطاب المغنطيسية إنما هى مسميات للنقط التى ننظر منها إلى المجال ، ولابد دائماً من وجود قطبين . إنها لافتات (يفط) أكثر منها وحدات فيزيائية . ويهمنا أن نؤكد هذه الحقيقة لتحاشى الوقوع فى الخطأ الشائع الناتج من اعتبار الأقطاب المغنطيسية كمرادفات للشحنات الكهربية . فالأمر فى الحقيقة بالعكس ، وعلينا أن ننظر إلى الشحنات على أنها هى وحدها التى لها كيان واقعى — وأن حركتها فى اتجاهات خاصة هى التى تخلق تلك المواضع التى يتركز فيها المجال ، والتى نسميها بالأقطاب المغنطيسية .

١٤ — ٥ المغنطيسات الحديدية :

لقدعرفنا المجال المغنطيسى بأنه منطقة نفوذ للشحنات المتحركة . وتساعدنا البوصلة والقضبان المغنطيسية فى وصف وتصوير هذه المجالات . وفى الواقع كان استعمال الحديد لدراسة تأثيرات التيار هو النافذة التى هيأت لنا اللمحة الأولى نحو كنه المجال المغنطيسى . ومتى عرفنا أن للتيار مجالا مغنطيسيًّا بحرف إبرة البوصلة ، فالسؤال الذى قد يتبادر إلى الذهن لأول وهلة هو : كيف يتأتى لقضيب المغنطيس أن يكون له مجال وهو لا يحمل تياراً ؟ إن النظرية الكاملة لهذه الظاهرة المعروفة بالفيرومغنطيسية ، أو المغنطيسية الحديدية تبلغ من التعقيد حدًّا لا يروق معه عرضها فى هذا الكتاب . وسنكتفى هنا بتقديم شرح وصفى لهذه النظرية .

هناك حقيقتان هامتان عن المغنطيسات ينبغى أن تفسرهما النظرية ، أولاهما أن ثلاثة عناصر فقط من بين سائر عناصر الجدول الدورى هى التى تظهر فيها المغنطة : الحديد والكوبلت والنيكل ، والحديد أبرزها تأثيراً . والحقيقة الثانية أن المغنطة يمكن إزالتها بالطرق الكافى أو بالتسخين ، فيفقد المغنطيس خواصه . وتوحى هذه الحقيقة الأخيرة بأن ظاهرة المغنطيسية ترتبط ارتباطاً وثيقاً بذرات أو جزيئات المادة نفسها . وقد عرضنا فى بند ١١ — ٥ الآراء السائدة عن تركيب الذرة من نواة موجبة تدور حولها إلكترونات سالبة . ودعنا الآن نعتبر واحداً من

هذه الإلكترونات الدائرة فى فلك النواة (شكل ١٤ — ٩) . فبما أن الإلكترون شحنة متحركة ، فهو يؤلف تياراً ، ولو أنه بطبيعة الحال تيار ضئيل جداً . ولكن التيار المار فى حلقة يولد مجالا مغنطيسياً مماثلا للمجال الناشىء من قضيب مغنطيسى قصير . فإذا كان فى الذرة عدد من الإلكترونات المتحركة فى مسارات متوازية والدائرة فى الاتجاه

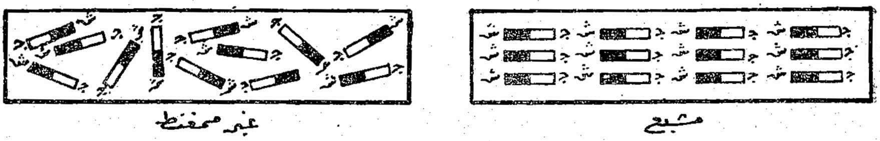


(شكل ١٤ — ٩)

نفسه ، فسوف تعاون هذه المغنطيسات الأولية بعضها البعض لتوليد مغنطيس ذرى أقوى . وبالإضافة إلى نشوء المغنطيسات الأولية بدوران الإلكترون فى فلك النواة ، فمن الممكن أيضاً أن تنشأ بطريقة أخرى . فقد ثبت فى الفيزياء الذرية بالدليل الحاسم أن كل إلكترون فى الذرة يدور حول محوره هو أثناء دورانه فى الوقت نفسه حول النواة . والوضع مشابه لدوران الأرض حول نفسها أثناء دورانها حول الشمس . وتسمى حركة الإلكترون حول محوره باللف . وينشأ عن حركة اللف لشحنة الإلكترون مجال مغنطيسى (شكل ١٤ — ٩) قطباه على امتداد محور اللف . (لاحظ أن حركة الشحنة الموجبة فى اتجاه معين تكافىء تيارا متحركاً فى الاتجاه المضاد . واتجاه الأقطاب فى شكل ١٤ — ٩ ينعكس فى حالة الشحنة الموجبة) . فإذا كانت المغنطيسات الأولية الناشئة من الحركة المدارية وحركة اللف للإلكترونات مرتبة ترتيباً جزئيًّا أو كليًّا ينتج عن ذلك مغنطيس ذرى قوى . ومن العجيب أن هذا لا يحدث إلا فى حالة العناصر الثلاثة التى ذكرناها ، وهى الحديد والكوبلت والنيكل ، ولو أن بعض السبائك الخاصة قد تظهر فيها هذه الخاصية . وفى داخل قضيب من الحديد تميل المغنطيسات الذرية إلى الانتظام ضمن أسراب ، تكون كل الذرات فيها مرتبة على نسق يتيح لكل سرب منها مجالا مغنطيسيًّا قوياً . ولكن ، بدون استخدام مجال خارجى ، تكون مجالات الأسراب المختلفة متجهة فى اتجاهات عشوائية غير منتظمة (شكل ١٤ — ١٠) . وتساعد الحركة الحرارية

المعتادة للجزيئات على الاحتفاظ بهذه الاتجاهات العشوائية . ذلك هو الوضع داخل قضيب من الحديد غير الممغنط .

ولنفرض الآن أننا وضعنا قضيباً من الحديد المعتاد داخل ملف لولبي . فى هذه الحالة يعمل المجال المغنطيسى الناشىء من تيار الملف على ترتيب أسراب الذرات بحيث تشير أقطابها الشمالية إلى اتجاه المجال الخارجى . وإذا كان ذلك المجال قوياً بدرجة كافية يكون ترتيب الأسراب تاماً (شكل ١٤ — ١٠) ، ويقال



(شكل ١٤ — ١٠)

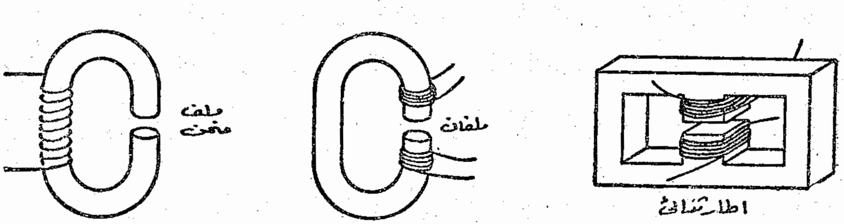
للحديد فى هذه الحالة : إنه ممغنط إلى درجة التشبع . ومتى قطع التيار ، أو أبعد الحديد عن فعل المجال ، فقد تنشأ حالتان تبعاً لكون الحديد « صلباً » أو « مطاوعاً » ، وإذا كان القضيب من الصلب القاسى تحتفظ الأسراب بالقسط الأوفر من تنسيقها وانتظامها وينشأ قضيب مغنطيسى مستديم . غير أن الطرق العنيف قد يخل بنظام الأسراب فتنعدم المغنطيسية فى القضيب . كما أن رفع درجة الحرارة إلى حد كاف قد يؤدى إلى النتيجة نفسها ، إذ يترتب عليه حدوث رجات حرارية فى الأسراب ينقلب معه نظامها فتزول المغنطة . ومآل المغنطة إلى الزوال فى آخر الأمر بسبب الحركة الحرارية ، حتى فى درجات الحرارة المعتادة للغرفة ، ولو أن حدوث تغيير ملحوظ قد يستغرق سنوات . وفى الحديد النقى « الحديد المطاوع » يختل اصطفاف المجاميع عقب قطع مجال الملف مباشرة . وبعض أصناف الحديد والصلب تسهل مغنطتها كما يسهل نزع المغنطة عنها ، فى حين أن بعض الأصناف الأخرى تصعب مغنطتها ولكنها تحتفظ بمغنطتها إذا مغنطت . والأرض نفسها كرة ممغنطة تكافئ قضيباً مغنطيسياً يقع طرفاه قرب القطب الشمالى الجغرافى والقطب الجنوبى الجغرافى .

وتتمشى هذه الصورة عن المغنطة المستديمة مع الدلائل التى تشير إلى أن المغنطيسية ليست إلا خاصية من خصائص التيار الكهربى . فالمغنطيس الثابت يستمد خصائصه من التيارات الإلكترونية الذاتية فى ذراته . ولا يحتاج من المعونة الخارجية إلا القدر الذى يساعد على اصطفاف المجاميع المغنطيسية فيه . وليست أقطاب المغنطيس سوى تلك المواضع التى تبدو خطوط القوة كما لو كانت مركزة فيها عند ما ننظر إليها من خارج المغنطيس .

١٤ ــ ٦ المغنطيسات الكهربية :

لو استخدمت قطعة من الحديد المطاوع كقلب لملف حلزونى . لتمغنطت بفعل المجال المغنطيسى الناتج من تيار الملف . وتكون محصلة المجال المغنطيسى عبارة عن مجال التيار مضافاً إليه مجال الحديد الممغنط . ولما كان المجال الأخير غالباً كبيراً بالنسبة للمجال الأول ، يتبع ذلك أن كفاءة الملف كمغنطيس تزداد ازدياداً هائلا جداًّ بهذه الوسيلة . ويسمى الملف ذو القلب الحديدى بالمغنطيس الكهربى . ويعود استخدام الحديد المطاوع إلى ميله لفقد المغنطة عند قطع تيار الملف . بهذه الكيفية يمكن السيطرة على شدة المغنطيس الكهربى عن طريق السيطرة على تيار الملف .

وإذا ثنى القالب الحديدى لمغنطيس كهربى بشكل قوس يواجه قطباه أحدهما الآخر (شكل ١٤ ــ ١١) ، ينشأ فى المنطقة بين القطبين مجال مغنطيسى



(شكل ١٤ ــ ١١)

قوى ومنتظم إلى حد معقول . وقد يمتد الملف حامل التيار فيملأ كل طول الحديد . ولكن من الأنسب غالباً أن يكون طول الملف أقصر من طول القالب ، بل قد

يكون من الأفضل أحياناً استعمال ملفين متصلين بحيث يعمل مجالا هما فى الاتجاه نفسه. ويسمى القالب الحديدى عادة بالرباط. وفى كثير من الظروف يتصل بالقطبين رباطان من الحديد ، كما يرى فى المثال الثالث من شكل ١٤ — ١١ ، وهنا يساعد الحديد الإضافى على حسن توزيع المجالات المغنطيسية الكبيرة فى مساحات كبيرة نسبيًّا . وأنواع المغنطيسات الكهربية المبينة فى شكل ١٤ — ١١ تستعمل بكثرة فى تجارب الفيزياء الذرية .

١٤ — ٧ القوة المؤثرة على تيار فى مجال مغنطيسى :

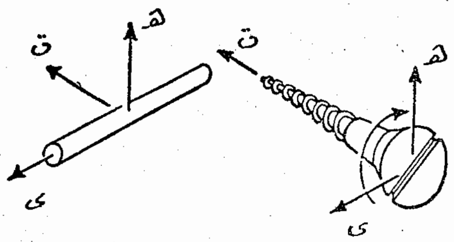
لقد تعمدنا إلى هذه اللحظة أن نتحاشى تعريف المجال المغنطيسى ه تعريفاً كميًّا . إذ من العسير هنا أن ننسج تعريفاً على منوال تعريفنا للمجال الكهربى (قوة/شحنة) ، وذلك لعدم وجود قطب اختبار مغنطيسى . كما أننا لم نعين تعييناً كميا القوة المتبادلة بين مغنطيسين . ويمكنا تحقيق الهدفين معاً ببحث القوة بين مجال مغنطيسى (صادر من مغنطيس كهربى بعيد أو مغنطيس ثابت ، بل يمكن أن يكون حتى مجال الأرض نفسه) وبين تيار فى ذلك المجال (انظر شكل ١٤ — ١٢) . ولا يتأتى اشتقاق العلاقة بين القوة والمجال والتيار من المبادئ التى سبق أن أثبتناها فى مناقشتنا عن الكهربا . فهى علاقة مبنية على أسس تجريبية قائمة على الارتباط بين التيار ومجاله المغنطيسى ، وهو الارتباط الذى لاحظه « أمبير » عمليا فى عام ١٨٢٠ . وببعض الأدوات وسلسلة من التجارب التأكيدية يمكننا أن نتوصل إلى قانون القوة ، على أن اتباع هذه الوسيلة من شأنه أن يبعدنا كثيراً عن موضوع البحث . ولذا فسنقنع بذكر القانون كنتيجة لمشاهدات تجريبية .

إذا مر تيار فى موصل عمودى على مجال مغنطيسى فالقوة المؤثرة على الموصل تساوى حاصل ضرب طوله وشدة التيار وشدة المجال المغنطيسى .

وإذا عبرنا عن ذلك بالرموز ، فالقوة المؤثرة على تيار هى

$$\overleftarrow{\text{ق}} = \text{ل ى ه}$$

حيث ل طول الجزء من الموصل الواقع فى المجال المغنطيسى هـ فى اتجاه عمودى عليه . وسنفسر معنى الرمز ← فى بند ١٤ – ٩ .



(شكل ١٤ – ١٢)

وبالاستعانة بقانون القوة يمكننا الآن أن نعرف شدة المجال المغنطيسى على النحو التالى :

وحدة المجال المغنطيسى هى ذلك المجال الذى لو أثر على موصل عمودى على اتجاهه ويحمل تياراً شدته وحدة إلكتروستاتيكية واحدة يعانى الموصل قوة مقدارها داين واحد .

وليس للوحدة المعروفة بهذا التعريف اسم خاص ، وشأنها فى ذلك شأن وحدة شدة المجال الكهربى م ، وحينما نذكرها نشير إليها بالوحدة الإلكتروستاتيكية للمجال المغنطيسى . ويلاحظ أن وجود الكميات الديناميكية ق ، ل فى القانون يمنعنا من استعمال الوحدة العملية للتيار . والوحدة الإلكتروستاتيكية للمجال المغنطيسى كبيرة جداً . ولهذا تستعمل بدلا منها فى الأغراض المعملية وحدة أخرى تسمى الأورستد .

$$\text{الأورستد} = \frac{١}{٣ \times ١٠^{١٠}} \text{ و.إ. س . للمجال المغنطيسى}$$

ومع ذلك فالاورستد ليس من ضمن نظام الوحدات العملية ، وإنما ذكرناه هنا فقط بسبب شيوع استعماله . وتولد المغنطيسات الثابتة المعتادة مجالات شدتها فى حدود بضع مئات أوبضع آلاف أورستد . ويعتبر المجال الذى شدته عدة آلاف أورستد مجالا قويا .

١٤ – ٨ القوة المؤثرة على شحنة تتحرك فى مجال مغنطيسى :

ولوأن التيارات الكهربية العادية تمثل بلايين الشحنات المارة خلال أية نقطة فى الثانية، فكذلك الشحنة المتحركة الواحدة تؤلف تياراً . وقد أشرنا إلى

هذه الحقيقة عند مناقشة نظرية المغنطيسات المستديمة . على أنه فى حالة الشحنة المفردة يصبح المقصود بطول الموصل ل فى العلاقة المذكورة فى البند السابق هو طول مسار الشحنة خلال المجال المغنطيسى الذى تخترقه . فإذا راعينا ذلك ، يمكننا أن نعدل فى صياغة قانون القوة بحيث يسرى على الشحنة المفردة المتحركة .

وعلى ضوء تعريف التيار ، بطريقة أن الشحنة س المتحركة فترة من الزمن ن تكافئ تياراً $ى = \frac{س}{ن}$ ينتج من ذلك أن

$$ق = ل ى \overleftarrow{هـ} = \frac{ل س هـ}{ن}$$

وبما أن $\frac{ل}{ن}$ هى المسافة التى تحركتها الشحنة فى المجال المغنطيسى مقسومة على الزمن اللازم لقطع هذه المسافة ، وبعبارة أخرى $\frac{ل}{ن}$ = سرعة الشحنة=ع ، فإن

$$ق = س ع \overleftarrow{هـ}$$

ويعطى هذا التعبير القوة المؤثرة على شحنة متحركة ، وسنلجأ إليه بين آن وآخر لتفهم كثير من التجارب الذرية ولحساب نتائجها .

١٤ ــ ٩ اتجاه القوة المؤثرة على تيار فى مجال مغنطيسى :

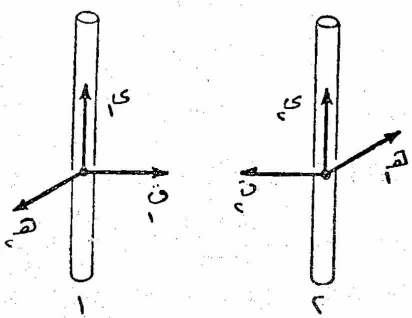
رأينا أن مقدار القوة المؤثرة على تيار فى مجال مغنطيسى يتعين من القانون الوضعى

$$ق = ل ى \overleftarrow{هـ}$$

ولإكمال وصفنا للقوة ق ينبغى أن نحدد اتجاهها أيضاً . ولكى يتم لنا ذلك ، علينا أن نلجأ إلى المشاهدات التجريبية . وقد وجدنا فى بند ١٤ ــ ١ أن التيارين المارين فى الاتجاه نفسه يجذب أحدهما الآخر ، فى حين أن التيارين المارين فى اتجاهين متضادين يتنافران . وتعميم هذه القاعدة يتطلب قدراً خاصًّا من المعرفة بتحليل الكميات المتجهة التى يتضمنها الموضوع .

ويبين الشكل ١٤ ــ ١٣ سلكين متوازيين يحملان تيارين فى الاتجاه نفسه . وقد دلت التجربة على أن هذين التيارين يتجاذبان ، وبهذا يتحدد اتجاه القوتين

ق$_{١}$ ، ق$_{٢}$ المؤثرتين على السلك (١) والسلك (٢) . والمجال المغنطيسى الذى يقع فيه التيار (١) هو المجال هـ$_{٢}$ الناشئ من التيار (٢) ، وبالمثل المجال عند ى$_{٢}$ هو هـ$_{١}$ الناشئ من التيار ى$_{١}$ وتدلنا قاعدة إبهام اليد اليمنى على أن المجال الناشئ من ى$_{٢}$ يتألف من دوائر متحدة المركز تتخذ على مقربة من ى$_{١}$ الاتجاه الذى دمغناه بالرمز هـ$_{٢}$ فى شكل ١٤–١٣ . وبالكيفية نفسها يتحدد اتجاه المجال هـ$_{١}$ فى المنطقة الملاصقة للتيار ى$_{٢}$. ويمكن تعميم هذه العلاقات المتجهة فيما يعرف بقاعدة البريمة اليمنى ، وهى :



(شكل ١٤ – ١٣)

إذا أديرت بريمة يمنى من ى إلى هـ فاتجاه حركة البريمة هو اتجاه ق نفسه .

وتعبيراً لهذا المعنى ، وضع قانون القوة بالصورة

$$ق = ل\ \overleftarrow{ى\ هـ}$$

حيث $\overleftarrow{ى\ هـ}$ يفيد دوران ى نحو هـ . والمفروض أن تكون البريمة دائماً يمنى . (يلاحظ أن إبهام وأصابع اليد اليمنى يمكن أن تقوم تماماً مقام البريمة — فدوران الأصابع من ى إلى هـ يوجه الإبهام نحو اتجاه القوة) ويوضح شكل ١٤ — ١٢ قاعدة البريمة ، ويستطيع الطالب أن يتحقق من أنها تعطى الاتجاه الصحيح للقوة فى شكل ١٤ — ١٣ .

وينبغى أن يستقر فى الأذهان أن القوة بين تيارين إنما هى فى الواقع قوة بين أحد التيارين وبين المجال المغنطيسى للتيار الآخر . وإلى جانب ذلك فاتجاه القوة المؤثرة على تيار يكون عمودياً على كل من التيار والمجال المغنيطسى الواقع على التيار .

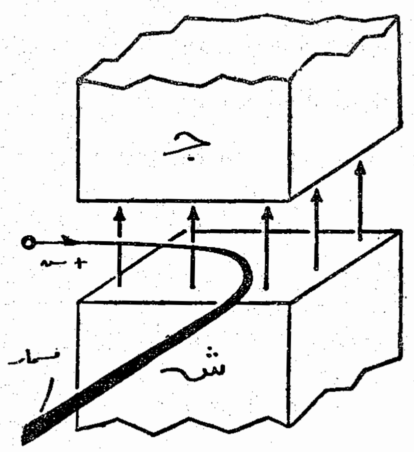
١٤ — ١٠ القوة المؤثرة على شحنة حرة متحركة :

كثيراً ما تصادفنا فى الفيزياء الذرية حالة شحنة مفردة تتحرك فى فراغ خلال

مجال مغنطيسى . لنفرض أن الشحنة أيون موجب كتلته ك ، يتحرك بسرعة ع ، فى منطقة ليس فيها مجال كهربى . فالقوة المؤثرة على الأيون هى :

ق = س ع هـ

ويمكننا أن نعين اتجاه ق بإدارة بريمة يمنى (أو أصابع اليد اليمنى) من ع إلى هـ . وفى الحالة المبينة فى شكل ١٤—١٤ ، اتجاه ع نحو اليمين ، واتجاه هـ إلى أعلى : ع→ هـ↑ . وعليه ، فدوران ع نحو هـ يقودنا إلى الحكم بأن القوة ق متجهة إلى خارج مستوى الصفحة .



(شكل ١٤ — ١٤)

وبما أن الشحنة ليست حبيسة ضمن مادة موصل ، فسيتاح لها أن تخرج من مستوى الصفحة بفعل هذه القوة . فإذا والينا تحليل الاتجاه لكل نقطة على امتداد مسار الشحنة ، فسنجد دائماً أن القوة تعمل فى اتجاه عمودى على اتجاه الحركة طالما بقيت الشحنة فى المجال المغنطيسى — هذه القوة ، إذن ، قوة حانية تدفع الكتلة للحركة فى قوس من دائرة . وقد سبق أن سمينا مثل هذه القوة بالقوة المركزية الجاذبة (انظر بند ٣ — ٧) . وبمساواة تعبير القوة المركزية الجاذبة بالقيمة التى تختص بها هذه الحالة نجد أن

ك ع^٢ / نق = س ع هـ

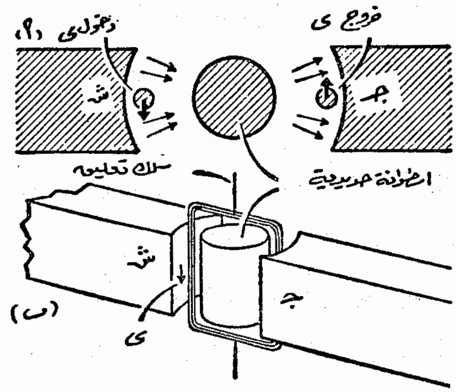
أى أن ك ع = س هـ نق

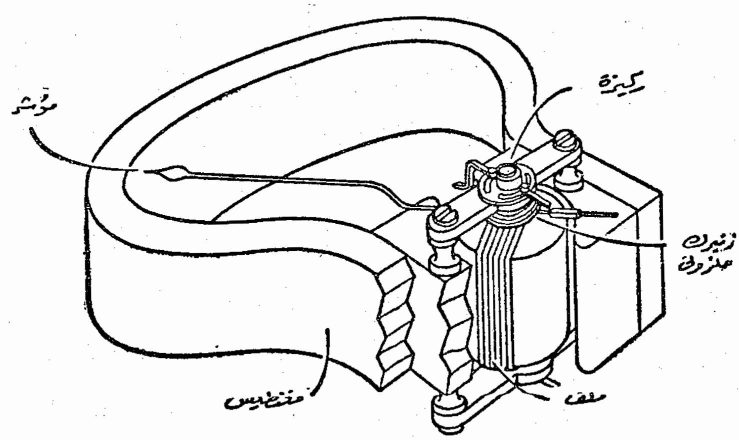
حيث نق نصف قطر المسار الدائرى . وبقياس س ، هـ ، نق ، يمكننا أن نعين كمية التحرك ك ع للجسيم . ويعتبر انحناء مسارات الجسيمات المشحونة بوساطة المجالات المغنطيسية من الوسائل العيارية المستعملة لقياس كمية التحرك للجسيمات فى الفيزياء الذرية والنووية .

١٤ — ١١ الجلفانومتر :

وجدنا أن القوة المؤثرة على موصل فى مجال مغنطيسى تناسب تتناسباً طردياً مع تيار الموصل ، بشرط أن يظل طوله والمجال المغنطيسى ثابتين . وقد استغلت هذه الحقيقة كوسيلة لقياس التيار بوساطة جهاز يسمى الجلفانومتر .

لنفرض أن ملفاً مستطيلا (شكل ١٤—١٥) يتدلى بين قطبى مغنطيس ثابت ، ويدخل إليه التيار من سلك التعليق العلوى ، ويخرج من السلك السفلى . ويبين





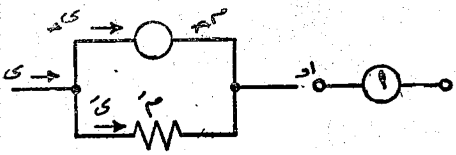
(شكل ١٤ — ١٥ و ١٤ — ١٦)

شكل ١٤—١٥ (ا) مقطعاً أفقياً للملف . وبتطبيق قاعدة البريمة على كل من جانبي الملف نجد أن هناك قوتين تعملان على جانبي الملف ، ويترتب عليهما حدوث

دوران فى عكس اتجاه عقارب الساعة لو نظرنا للملف من أعلى . ويترتب على هذا الدوران حدوث التواء مرن فى سلك التعليق العلوى يتزايد بتزايد الانحراف وفقاً لقانون هوك ، فيعمل على الحد من الانحراف . ويستقر الملف فى النهاية فى موضع اتزان متى تساوى عزم القوة المحدثة للانحراف (وهو ما يتناسب مع التيار) بعزم الالتواء فى سلك التعليق (وهو ما يتناسب مع زاوية الانحراف) . وعلى ذلك تكون زاوية الانحراف متناسبة مع التيار . ولكى يظل هذا التناسب صحيحاً للانحرافات الكبيرة ينبغى أن يبقى المجال المغنطيسى متعامداً دائماً على جوانب الملف . ويتحقق ذلك بتركيب اسطوانة ثابتة من الحديد داخل الملف دون أن تلامسه . ولقياس زاوية الانحراف يوضع مؤشر على الملف أو تعلق على الملف مرآة صغيرة ينعكس منها شعاع ضوئى على مقياس مدرج . ولزيادة الحساسية (أى القوة الحارفة الناشئة من تيار معين) يستخدم ملف يحتوى على عدد كبير من اللفات . ويمكن قياس تيارات ضئيلة جداً بجلفانومترات دقيقة فى تصميمها . ومتى كان عدد اللفات كبيراً ، وثقل الملف صغيراً وكان الملف معلقاً بعناية بوساطة سلك أو شريط رقيق من الذهب ، فمن الممكن كشف تيارات تبلغ من الصغر نحو $١٠^{-١٠}$ أمبير . وفى جلفا نومترات المعامل المعتادة القابلة للنقل ، يركب الملف على ركائز من العقيق (شكل ١٤ — ١٦) . ومع أن هذه الأجهزة قد صممت لتتحمل الاستعمال العنيف ، فحساسيتها تسمح بقياس $١٠^{-٦}$ أمبير . وتتراوح مقاومة ملفات الجلفانومتر بين بضعة أومات إلى بضعة آلاف أوم .

١٤ — ١٢ الأميتر والفولطمتر :

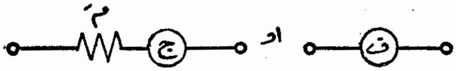
إذا فرضنا مثلا أن جلفا نومترا قد صمم بحيث ينحرف إلى نهاية مقياسه عند مرور تيار شدته $١٠^{-٦}$ أمبير ، فمرور تيار يزيد كثيراً عن هذه القيمة لابد أن يؤدى إلى إتلاف الجلفانومتر . وقد تتلف الركائز التى



(شكل ١٤ — ١٧)

يستند إليها الملف أو يختل تماماً نظام التعليق بالانحراف المفرط ، وقد يصهر سلك

الملف بحرارة التيار التى تتناسب مع ى^{٢}م ‍ د . وللحصول على جهاز يتيح لنا قياس التيارات الكبيرة (التى من مرتبة الأمبيرات مثلا بدلا من الميكرو أمبيرات) يعدل الجلفانومتر بوضع مقاومة صغيرة جداً على التوازى معه يطلق عليها عادة اسم المجزئ . وحينئذ يسمى الجلفانومتر المعدل بالأميتر . والغرض من هذه المقاومة الصغيرة تهيئة طريق سهل (عبره) للجزء الأكبر من التيار . ولما كان كسر التيار الكلى المار فى الجلفانومتر لا يتوقف إلا على مقاومة المجزئ ومقاومة الجلفانومتر ، لذا فقراءة الجلفانومتر تتناسب دائماً مع التيار الكلى المار فى الدائرة . ونظراً لأن الجلفانومتر أو الأميتر يستعمل فى قياس سريان التيار ، فلا بد من توصيله على التوالى (مباشرة) فى الدائرة . ومتى كان فرق الجهد بين طرفى الأميتر صغيراً ، فلن يكون له تأثير اضطرابى ملحوظ على الدائرة بمعنى أن إدخاله فى دائرة يكاد لا يغير تيارها . وبما أن فرق الجهد عبر الأميتر ف = ى م، يستلزم ذلك أن تكون مقاومة الأميتر أقل ما يمكن . وصغر فرق الجهد عبر الأميتر مقياس لصلاحيته فى الدائرة التى يستعمل فيها .



(شكل ١٤ — ١٨)

أما الفولطمتر فهو جلفانومتر يشتمل على مقاومة كبيرة متصلة على التوالى معه (شكل ١٤ — ١٨) ، ويستعمل لقياس فرق الجهد بين نقطتين فى دائرة . ولذلك يوصل دائماً عبر (على التوازى مع) ذلك الجزء من الدائرة . وانحراف الجلفانومتر متناسب مع فرق الجهد ف . والغرض من المقاومة الكبيرة م المتصلة على التوالى هو الحد من التيار المار فى الجلفانومتر . ويتميز الفولطمتر الجيد بمقاومة داخلية عالية حتى لا يسحب من الدائرة إلا أقل قدر من التيار ، إذ أن مرور تيار كبير فى الفولطمتر يغير فرق الجهد المطلوب قياسه عن القيمة التى كانت موجودة قبل توصيل الفولطمتر .

تمارين

١ — سلك طوله ٤٠ سم ويحمل تياراً شدته ٢٠ أمبير ، وضع فى اتجاه عمودى على مجال مغنطيسى . فوجد أن القوة المؤثرة عليه ٨٠٠,٠٠٠ داين . احسب شدة المجال المغنطيسى . (لاحظ الوحدات) .

الجواب : $٣,٣ \times ١٠^{-٧}$ و.ا. س . أو $١٠^{٤}$ أورستد

٢ — ألكترون (شحنته $٤,٨ \times ١٠^{-١٠}$ و.ا. س .) يعانى قوة مقدارها ٠,٠١ ميكروداين فى مجال مغنطيسى شدته $١٠^{-٨}$ و . ا . س ٣٠٠ أورستد) أوجد سرعة الالكترون .

الجواب : $٢,٠٨ \times ١٠^{٩}$ سم/ث

٣ — ثبت مغنطيس بشكل حذاء الفرس (الحدوة) فى مستوى رأسى بحيث كان قطبه الشمالى فى أعلى وضع بالنسبة لقطبة الجنوبى . ثم مر تيار خلال سلك أفقى يقع بين قطبى المغنطيس . ارسم شكلا يوضح ذلك . واتخذ اتجاهاً لمرور التيار ثم عين اتجاه القوة المؤثرة على السلك .

٤ — يتحرك أيون موجب فى مستوى أفقى متجهاً من الشرق إلى الغرب ليدخل مجالا مغنطيسياً . وقد لوحظ أن المجال يحرفه إلى أسفل خارج المستوى الأفقى . فما هو اتجاه المجال المغنطيسى ؟

٥ — تتحرك حزمة من الإلكترونات فى مستوى أفقى بحيث يكاد القطب الجنوبى لقضيب مغنطيسى يقع فى مستوى عمودى على مسار الإلكترونات . فما هو اتجاه القوة المؤثرة على الإلكترونات ؟

٦ — إذا كانت كتلة الإلكترون فى المسألة رقم ٢ هى $٩,١ \times ١٠^{-٢٨}$ جم فما هو نصف قطر انحناء المسار فى المجال المغنطيسى فى تلك المسألة ؟

الجواب : ٣,٩٤ مم

٧ — أيون كتلته ٢×١٠^{-٢٣} وشحنته $٤,٨ \times ١٠^{-١٠}$ و . ا . س . وجد أن نصف قطر انحناء مساره متر واحد فى مجال مغنطيسى شدته ٥×١٠^{-٧} و . ا . س . أوجد كتلة الأيون وطاقة حركته .

الجواب : $١,٢ \times ١٠^{٩}$ سم/ ث ، ١٤,٤ ميكروارج

مراجع مقترحة للاطلاع

Magie, W. F., "Source Book in Physics," New York, McGraw-Hill Book Co., 1935.

يجد القارئ فى صفحة ٤٣٦ قصة اكتشاف أورستد للمجال المغنطيسى للتيار عام ١٨٢٠ . ويجد فى صفحة ٤٤٧ النص الأصلى لقانون أمبير عن القوة المتبادلة بين التيارات .

Moulton, F. R. and Schifferes, J. J., "The Autobiography of Science," New York, Doubleday Doran and Co., 1945.

يحتوى على مقتطفات من كتاب جلبرت « عن المغنطيسية والأجسام المغنطيسية وهو أول بحث قيم فى العلوم نشر فى إنجلترا عام ١٦٠٠ . وهو كتاب شيق .

الفصل الخامس عشر

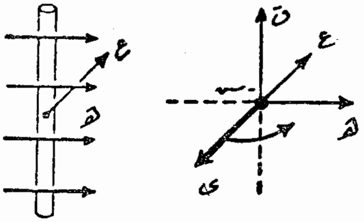
القوة الدافعة الكهربية التأثيرية

١٥ ـ ١ حركة موصل فى مجال مغنطيسى :

كانت الظاهرة الأساسية فى الفصل السابق ، هى القوة التى تعانيها شحنة تتحرك فى مجال مغنطيسى . وفى حالة تيار يمر فى سلك تظهر هذه القوه كفعل متبادل بين المجال المغنطيسى الخارجى وبين الإلكترونات المتحركة فى السلك ، التى يدفعها إلى الحركة وجود مجال كهربى على امتداد السلك (أى وجود قوة دافعة كهربية) . وعكس هذه الظاهرة ، أى توليد المجالات الكهربية وسريان التيار بوساطة حركة الأسلاك أو المغنطيسات ، هو موضوع دراستنا فى هذا الفصل . ومن الناحية التاريخية ، كان « فاراداى » من السابقين إلى اكتشاف هذه التيارات ، التى سميت بالتيارات التأثيرية أو تيارات الحث . ولا غرابة أن تكون الصدفة قد لعبت دوراً كبيراً فى اكتشافها . ومما يذكر أن «هنرى» قد اكتشفها أيضاً دون أن يكون على دراية بما فعله « فاراداى » فى هذا الصدد . وقد عرضنا هذه الظاهرة كما لو كانت شيئاً جديداً يختلف عن الموضوع الذى تناولناه بالبحث فى الفصل الرابع عشر ، وحتى فى العصر الحاضر ، كثيراً ما يعالج موضوع التيارات التأثيرية كما لو كان موضوعاً منفصلا عما نعرفة ونتوقعه . إلا أنه كان يمكننا فى الواقع أن نتنبأ بالتيارات التأثيرية كنتيجة حتمية للتحليل المنطقى المترتب على معرفتنا بالقوى المؤثرة على الشحنات المتحركة فى مجال مغنطيسى . وسنسير على هذا النهج فيما يلى .

رأينا أن السلك الذى يحمل تياراً فى مجال مغنطيسى يعانى قوة . ولكى نمنع حركة الموصل المترتبة على هذه القوة ، لابد من تعريض الموصل لقوة خارجية مساوية ومضادة لتلك القوة . ولنفرض الآن أن لدينا موصلا لا يسرى فيه تيار ما . وفى

الحقيقة لا يشترط أن يكون ذلك الموصل جزءاً من دائرة ، بل يكفى أن يكون مجرد سلك . فإذا أثرنا على الموصل بقوة خارجية تتيح له أن يتحرك عمودياً على مجال مغنطيسي . فالسؤال الطبيعى الذى يتبادر إلى الذهن هو : ألا يكون لهذه القوة رد فعل على الموصل ؟ إن كل ما فعلناه فى الواقع ، هو أننا عكسنا وجهة نظرنا . ويمكننا أن نتبع الاستدلال نفسه والتفكير الذى تدرجنا فيه فى الفصل السابق . إلا أن ثمة فارقاً ملحوظاً ينحصر فى أن إلكترونات الموصل لا تتحرك هنا على امتداد السلك بفعل قوة دافعة كهربية خارجية ، وإنما تسير بسبب حركة السلك نفسه وفى اتجاهها . ولنفرض أن المجال المغنطيسى أفقى ويقع فى مستوى الصفحة (شكل ١٥ — ١) ، وأن السلك رأسى ويتحرك عمودياً على مستوى الشكل متجهاً نحو الداخل. وبما أننا بتحريك السلك نحرك معه إلكتروناته فى اتجاه حركته العمودية على اتجاه المجال المغنطيسى . لهذا تنشأ على طول مسار السلك تيارات دقيقة كل منها متجه إلى خارج مستوى الصفحة (إذ أن كل إلكترونات السلك السالبة تسير إلى داخل ذلك المستوى) . ويتفاعل كل من هذه الشحنات المتحركة مع المجال المغنطيسى ، ويتحدد اتجاه القوة المؤثرة عليها بتطبيق قاعدة البريمة اليمنى . وبإدارة التيار ى نحو المجال هـ ، نجد أن القوة المؤثرة على كل إلكترون تتجه إلى أعلى على امتداد السلك. وبما أن الإلكترونات حرة الحركة إلى حد معقول فسوف تندفع إلى أعلى السلك . كما لو كانت واقعة تحت تأثير مجال كهربى . وتصبح النهاية العليا للسلك سالبة بسبب تراكم الإلكترونات فيها ، كما تصبح النهاية السفلى موجبة بسبب رحيل الإلكترونات منها . وتتفاعل الإلكترونات أثناء انتقالها إلى الطرف الأعلى مع المجال المغنطيسى فتولد رد الفعل المتجه إلى خارج مستوى الشكل ، وهو القوة التى كنا نبحث عنها من أول الأمر. أصبح لدينا الآن فرق جهد بين طرفى الموصل. وإذا وصل الطرفان فى دائرة خارجية يمر تيار طالما استمرت حركة الموصل بالنسبة



(شكل ١٥ — ١)

للمجال المغنطيسى .

وتعرف ظاهرة توليد تيار بحركة موصل خلال مجال مغنطيسى بالحث أو التأثير الإلكترومغنطيسى . وحيث إن الموصل قد أصبح الآن مصدراً لفرق الجهد ، لذا فهو يمتلك قوة دافعة كهربية تأثيرية ، ويسمى التيار الذى يمر فيه بالتيار التأثيرى . وإذا لم يتصل الموصل بدائرة خارجية فالإلكترونات الحرة داخل السلك تستمر فى المرور نحو أحدطرفيه إلى أن يصبح المجال الكهربى الناتج من تراكمها مساوياً ومضاداً للمجال الكهربى الناشئ من الحركة . وعلى أثر ذلك تبطل القوة المحدثة لمرور التيار ، ويبطل التفاعل المتبادل مع المجال المغنطيسى ، وبالتالى تنعدم المعارضة للقوة الخارجية . ولكن إذا سمح للتيار بالمرور فى دائرة خارجية فستستمر المعارضة ، ويتحتم بذل شغل خارجى للإبقاء على مرور التيار فى الدائرة الخارجية .

ولعلنا لسنا فى حاجة إلى القول بأن استنتاجنا هذا ، المستند إلى أسس ديناميكية ، تؤيده التجارب العملية تأييداً مطلقاً . ومما يجدر ذكره أن أكثر مصادر فرق الجهد شيوعاً ، وهو المولد الكهربى أو الدينامو ، ينبنى عمله على هذا المبدأ .

١٥ — ٢ اتجاه التيار التأثيرى — قانون لنز :

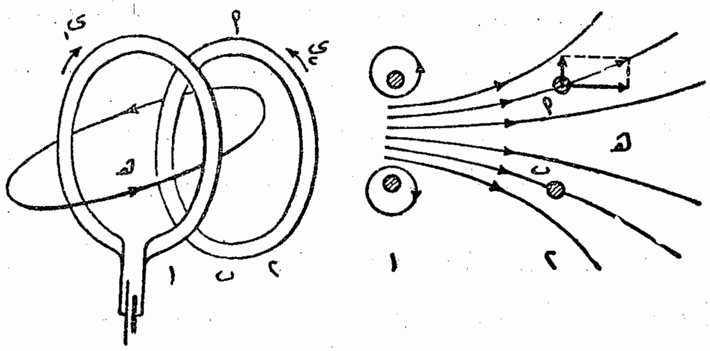
لقد وضح لنا من التحليل الذى قدمناه فى البند السابق أن اتجاه التيار التأثيرى يتحدد بأن فعله على المجال المغنطيسى يعارض القوة المحدثة . وتعرف هذه القاعده التى منها يتحدد اتجاه مرور التيار بقانون لنز . إلا أننا نستطيع أن نفهم هذا القانون فهماً أكثر عمقاً ، لو بحثناه على ضوء الشغل المبذول ومبدأ بقاء الطاقة ، إذ سنجد عندئذ أن التيار التأثيرى لابد أن يعارض القوة الخارجة إذا صح مبدأ بقاء الطاقة .

لنبحث أولا الشغل المبذول على موصل يتحرك بسرعة ثابتة خلال مجال مغنطيسى إن التيار التأثيرى يولد حرارة فى الموصل ، وهذه الطاقة الحرارية إنما تجىء من الشغل المبذول فى تحريك الموصل . ولكن الشغل المبذول لتزويد هذه الطاقة الحرارية إنما يبذل ضد قوة تعارض الحركة (لأن الشغل = قوة × مسافة) .

وعليه ، فبقاء الطاقة يستدعى أن يكون الفعل المتبادل والمجال معاً كساً للقوة الخارجية وهو ما ينص عليه قانون لنز .

١٥ ــ ٣ الحث بوساطة المجالات المغنطيسية المتغيرة :

من المناسب أن نذكر أن القوة الدافعة الكهربية التأثيرية ليست كلها وليدة لحركة موصلات فى مجالات مغنطيسية ، إذ يمكن توليدها أيضاً ، وفى حالات كثيرة جداً ، بوساطة مجالات مغنطيسية تتغير من حيث المقدار أو الاتجاه فى حين يبقى الموصل نفسه ساكناً دون حراك . ويمكننا أن نثبت بسهولة تامة أن تغير المجال المغنطيسى مع الزمن يولد قوة دافعة كهربية على امتداد موصل يقع فى ذلك المجال ولتأدية هذا الغرض نحلل المجالات والتيارات فى ملفين متوازيين يقع أحدهما على مقربة من الآخر .

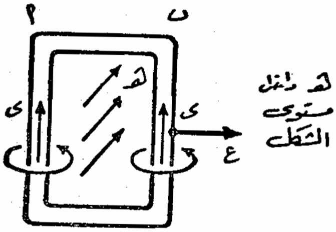


(شكل ١٥ – ٢)

اعتبر حلقتين من السلك مستوياهما متوازيان (شكل ١٥ــ٢) . ولنفرض أن تياراً يمر فى الحلقة (١) ، وأن الحلقة (٢) تقترب من الحلقة (١) . فحينئذ يزداد مع الزمن المجال المغنطيسى الذى يخترق الحلقة (٢) والناتج من الحلقة (١) . ويتبع ذلك ظهور تيار تأثيرى فى الحلقة (٢) يكون اتجاهه بحيث أن مجاله يعارض الاقتراب . ولتعيين اتجاه ذلك التيار دعنا نتأمل المجال المغنطيسى الناشئ

من الحلقة (١) عند نقطة ا فى شكل ١٥ ـ ٢ . هنا نلاحظ أن اتجاه المجال هـ لا ينطبق على اتجاه حركة الحلقة (٢) ، ويمكننا أن نحلل هـ إلى مركبتين إحداهما فى اتجاه الحركة والأخرى فى الاتجاه العمودى . وبتطبيق قاعدة البريمة اليمنى على المركبة العمودية (الرأسية) نرى أنه لكيما تظهر على الملف (٢) قوة مضادة لحركته ، أى قوة متجهة نحو اليمين فى شكل ١٥ ــ ٢ ، ينبغى أن يكون التيار عند ا عمودياً على مستوى الرسم ومتجهاً إلى أسفل . أما فعل هذا التيار على المركبة الأفقية للمجال هـ فينجم عنه قوة استطالة على الملف لا تلعب أى دور فى قانون لنز . وفى كل تحليل لقانون لنز على غرار ما تقدم سنجد أن مركبة هـ العمودية على الحركة هى وحدها الفعالة فى توليد تيار تأثيرى . وإذا كررنا الاستدلال السابق عند النقطة ب ، وهى أسفل نقطة فى الملف (٢) ، نجد أن التيار متجه إلى خارج مستوى الصفحة . وبالكيفية نفسها كان يمكننا بحث تأثير المجال المغنطيسى الناتج عن تيار الحث فى الملف (٢) على تيار الملف (١) . ولو فعلنا ذلك لحصلنا على رد الفعل على الملف (١) (رد الفعل المعتاد المصاحب لكل فعل) . وخلاصة كل هذه المناقشة أن المجال المغنطيسى المتغير الذى يخترق حلقة من السلك يولد تياراً تأثيرياً ، وبالتالى قوة دافعة كهربية ، على امتداد السلك .

يتبين من المثال السابق أن الطريقة التى يحدث بها تغيير المجال ليست فى حد نفسها ذات شأن . فيجوز أن يكون تغيير المجال راجعاً إلى حركة الحلقة (٢) ، أو إلى تغيير التيار فى الحلقة (١) ، أو إلى هذين العاملين مجتمعين معاً . نرى من ذلك بوجه عام أن تغيير المجال المغنطيسى خلال حلقة يولد قوة دافعة كهربية على امتداد أجزاء الموصل ، كيفما كانت الوسيلة التى يحدث بها هذا التغيير . وتظهر هذه القوة الدافعة الكهربية فى كل منحن مغلق.



(شكل ١٥ ــ ٣)

بغض النظر عن كونه حلقة موصلة أو شيئاً آخر غير ذلك . وبداهة أن التيار التأثيرى لا يمر إلا خلال دائرة موصلة .

وثمة وجه فى ظاهرة الحث الإلكترومغنطيسى يستحق الملاحظة . فالإلكترون داخل الموصل يعانى قوة عند وجود مجال مغنطيسى متغير ، تماماً كما يعانى قوة تحت وطأة مجال كهربى على امتداد الموصل ، مما يدعونا إلى اعتبار أن المجال المغنطيسى المتغير يولد مجالا كهربيًّا . وعليه ، فهناك نوع من التماثل ، ففى حين أن المجال المغنطيسى المتغير يسبب حركة فى الشحنة ، فالشحنة المتحركة تولد مجالا مغنطيسيًّا . والتماثل موجود كذلك بين الراصدين . ولتوضيح ذلك اعتبر المثال الذى مر بنا فى شكل ١٥ — ٢ . فلو تصورنا راصداً موجوداً على الحلقة (٢) فإنه يرى بسبب حركة الحلقة (٢) مجالا مغنطيسيًّا متغيراً يصاحبه مجال كهربى . وبالمثل ، إذا تخيلنا راصداً على الحلقة (١) فبالإضافة إلى المجال الكهربى الذى يفرضه وجود البطارية الخارجية ، فالراصد يرى مجالاً مغنطيسياً متغيراً يصاحبه مجال كهربى بسبب تأثير الحلقة (٢) . وهذا الفعل المتماثل للكهربا المتحركة هو ما يبرر وصفنا لها بصفة « إلكترومغنطيسية » . وقد سبق أن أشرنا على سبيل المثال إلى الضوء وإلى موجات الراديو كأمثلة للأمواج الإلكترومغنطيسية . ونحن إذ نؤكد هذه العلاقات المتماثلة ، علينا أن نتذكر رغم ذلك أن الشحنة الساكنة بالنسبة لراصد ليس لها مجال مغنطيسى ، بل مجال كهربى فقط .

١٥ — ٤ التيارات التأثيرية فى الملفات :

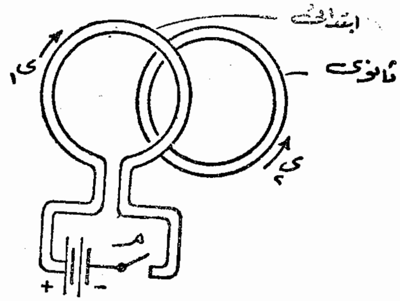
لإيضاح موضوع الحث الإلكترومغنطيسى سنبحث عدداً من الأمثلة ، كلها تتعلق بالملفات وبالحلقات المغلقة المكونة من لفة واحدة أو أكثر من لفات سلك موصل . وسنبحث فى أول الأمر الظروف التى لا يتولد فيها تيار تأثيرى فى ملف متحرك .

المثال الأول : تخيل ملفًّا مستطيلا يتحرك عموديًّا على مجال مغنطيسى منتظم . يبين شكل ١٥ — ٣ هذه الحالة ، وفيه يفترض أن المجال المنتظم متجه داخل مستوى الشكل ، وأن الملف يتحرك نحو اليمين ويقع فى مستوى الشكل . دعنا نعين اتجاه التأثير فى كل من الجانبين ا ، ب للملف (يلاحظ أن قمة الملف وقاعه

من قطب مغنطيسى ، فسوف يكون للمجال المغنطيسى هـ مركبة تقطع جوانب الملف فى اتجاه عمودى على المحور . فإذا كان القطب الشمالى هو القطب الأقرب إلى الملف ، فسيكون اتجاه هذه المركبة إلى الخارج ، بعيداً عن القطب المقترب (شكل ١٥ — ٦) . ولإعاقة اقتراب القضيب المغنطيسى لابد أن تنشأ على الملف قوة معاكسة تميل إلى إبعاد المغنطيس (وبالتالى إعاقة حركة المغنطيس بالنسبة للملف) . ويشترط أن تؤثر هذه القوة على الملف فى اتجاه إلى داخل مستوى الصفحة . وبإدارة ى نحو هـ بالكيفية التى تعطينا الاتجاه الصحيح للقوة ق نجد أن التيار التأثيرى ى لابد أن يمر فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة إذا نظرنا إلى الملف من ناحية المغنطيس . وإذا عكسنا اتجاه حركة المغنطيس ، يتحتم على الملف أن يعمل على تتبع المجال المتقهقر حتى يعوق الحركة النسبية ، فينعكس اتجاه التيار التأثيرى .

١٥ — ٥ الحث بين ملفين ثابتين — المحول :

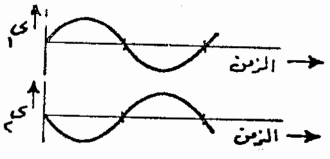
سنرى الآن أنه يمكن توليد تيار تأثيرى فى موصل بوساطة مجال مغنطيسى دون حاجة إلى أية إزاحة فعلية لمصدر المجال . تصور ملفاً متصلا ببطارية خلال مفتاح ، وموضوعاً على مقربة من ملف آخر وفى موازاته (شكل ١٥ — ٧) . ويشابه هذا الترتيب ، الترتيب نفسه الذى اكتشف به فاراداى التيارات التأثيرية . ويسمى الملف الذى أدخل فيه التيار بوساطة مصدر خارجى بالملف الابتدائى ، كما يسمى الملف الذى يمر فيه التيار التأثيرى بالملف الثانوى . وتسمى المجموعة كلها بالمحول . فى اللحظة التى يتم فيها إغلاق الدائرة الابتدائية ، يأخذ التيار الابتدائى فى النمو تدريجيًّا فيزاداد المجال المغنطيسى المصاحب لذلك التيار . ومتى بلغ التيار قيمته النهائية يصبح مجاله ثابتاً . وفى خلال فترة نمو التيار ، يكون الملف الثانوى فى منطقة يتغير فيها المجال المغنطيسى ، فيتولد فيه تيار تأثيرى . أما اتجاه ذلك التيار فيمكن استنتاجه بالتحليل نفسه ، الذى اتبعناه فى حالة الملفين فى شكل ١٥ — ٢ . وينتج من ذلك أن التيار الثانوى ى٢ يجب أن يكون مروره



(شكل ١٥ — ٧)

فى عكس اتجاه حركة عقارب الساعة متى كان مرور التيار الابتدائى ى فى اتجاه حركة عقارب الساعة (شكل ١٥ — ٧) . ومتى استقرت قيمة التيار الابتدائى ى ، تؤول قيمة التيار الثانوى ى إلى الصفر . وإذا فتح المفتاح ، تنعكس العملية تماماً بسبب تقلص المجال المغنطيسى للتيار الابتدائى المتناقص المنهار . وإذا استعضنا عن البطارية والمفتاح بمصدر تيار متردد ، يستمر سريان التيار التأثيرى فى الملف الثانوى ، ويكون متردداً كتيار الملف الابتدائى (شكل ١٥ — ٨) . لاحظ جيداً أن أساس القوة الدافعة الكهربية التأثيرية فى الملف الثانوى هو المجال المتغير للملف الابتدائى ولا يتولد تيار ثانوى فى محول إذا مر فى ملفه الابتدائى تيار أحادى الاتجاه ثابت الشدة .

ولزيادة شدة المجال الذى يخترق الملف الابتدائى والملف الثانوى ، يهيأ الملفان على قالب حديدى مشترك (راجع بند ١٤ — ٦) . ويكون ذلك الحديد عادة مصنوعاً بشكل إطار ، يلف الملفان منفصلين على جانبين منه (شكل ١٥ — ٩ أ) ، أو يلف أحدهما فوق الآخر (شكل ١٥ — ٩ ب) . وفى بعض الأحيان يستعمل قضيب حديدى واحد بدل الإطار (شكل ١٥ — ٩ حـ) .

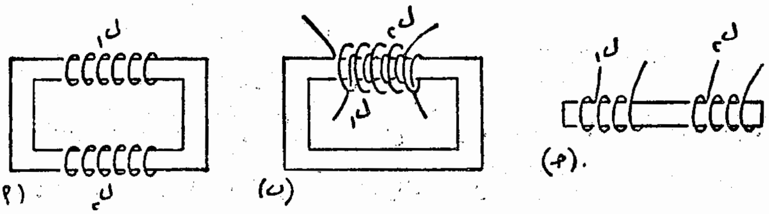


(شكل ١٥ — ٨)

وتنحصر فائدة المحول فى صلاحيته لتحويل قوة دافعة كهربية من قيمة إلى أخرى . وقد وجد أن القوة الدافعة الكهربية التأثيرية فى ملف لا يتوقف على عدد لفاته فحسب . بل يتوقف كذلك على النسبة بين عدد لفات الملف الثانوى وعدد لفات الملف الابتدائى . وفى الواقع

$$\frac{\text{ق. د. ك. فى الملف الثانوى}}{\text{ق. د. ك. فى الملف الابتدائى}} = \frac{\text{عدد لفات الملف الثانوى}}{\text{عدد لفات الملف الابتدائى}}$$

$$\frac{ق_{٢}}{ق_{١}} = \frac{ن_{٢}}{ن_{١}}$$



(شكل ١٥ — ٩)

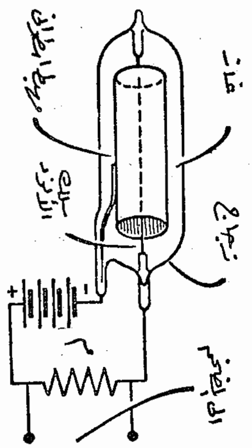
وهذه العلاقة صحيحة تماماً فى حالة المحول المثالى . وهو ذلك المحول الذى خطوط مجال أحد ملفيه تخترق كلها سائر لفات الملف الآخر . على أن هذه العلاقة لا تبعد كثيراً عن الواقع فى المحولات المعتادة . وإذا كان عدد لفات الملف الثانوى ($ن_{٢}$) أكثر من عدد لفات الملف الابتدائى ($ن_{١}$) فالقوة الدافعة الكهربية $ق_{٢}$ فى الملف الثانوى أكبر من القوة الدافعة الكهربية $ق_{١}$ فى الملف الابتدائى ، ويسمى المحول فى هذه الحالة بالمحول الرافع . ويسمى المحول الذى يؤدى عكس هذه العملية بالمحول الخافض . ولما كانت كفاءة المحولات التجارية تقرب من ١٠٠ ٪ ، بمعنى أنها تمدنا تقريباً بكل الطاقة التى نزودها بها ، يمكننا أن نقرر بدرجة كبيرة من الدقة أن :

القدرة الداخلة (أو المستنفذة) فى الملف الابتدائى = القدرة الخارجة من أو المتولدة فى الملف الثانوى أى أن : $ق_{١}\ ى_{١} = ق_{٢}\ ى_{٢}$

$$\therefore \frac{ى_{٢}}{ى_{١}} = \frac{ق_{١}}{ق_{٢}} = \frac{ن_{١}}{ن_{٢}}$$

وعليه ، فإذا كانت $ن_{٢}$ أكبر من $ن_{١}$ ترتفع القوة الدافعة الكهربية ، ولكن التيار ينخفض بالنسبة نفسها ويتبع ذلك أن المحول الخافض (والوصف هنا يعود دائماً

٢١ ـ ٨ الخلية الكهرضوئية :



(شكل ٢١ – ٦)

الخلية الكهرضوئية هى صورة معدلة للجهاز المبين فى شكل ٢١ ـ ٤ ، وقد أصبحت تستعمل الآن على نطاق واسع كأداة تخدم الهندسة والصناعة . وتتكون أساساً من نصف اسطوانة معدنية طليت من الداخل بقشرة أحد الفلزات القلوية . وثبت قرب محورها قطب مجمع (شكل ٢١–٦) . وتمتد أسلاك التوصيل خلال قاعدة الغلاف الزجاجى . والخلية مفرغة من الهواء لدرجة عالية . (توجد خلايا كهرضوئية غازية تملأ بكمية صغيرة من الغاز . وفى الخلايا التى من هذا الطراز يتضاعف التيار بالتأيين الغازى) . ويوصل السطح الحساس للضوء بجهد سالب بالنسبة للقطب المجمع ، وبذا يمر تيار فى الدائرة عند سقوط الضوء على الخلية . فالخلية إذن بمثابة مفتاح كهربى لدائرة ، يغلقها تحت تأثير الضوء . وقد وجد ذلك « المفتاح الضوئى » تطبيقات عديدة فى السينما الناطقة والتلفزيون وأجهزة الإنذار وأجهزة العد وفى عمليات أخرى لا تدخل تحت حصر .

تمارين :

١ ـ ما مقدار الطاقة فى كمة من الضوء الأخضر الذى طول موجته ٥٠٠٠ انجستروم ؟

الجواب : $٣,٩٦ \times ١٠^{-١٢}$ أرج

٢ ـ ما مقدار الطاقة فى الكمة المذكورة فى المسألة السابقة ، معبراً عنها بالإلكترون فولط ؟

الجواب : ٢,٤٨ أ ف

٣ ـ تبلغ أقصى حساسية للأذن فى الظروف المتالية $١٠^{-١٧}$ واط / سم من الصوت ، وتبلغ أقصى حساسية للعين نحو ٥ كمات / ث سم^{٢} من الضوء

الكهرضوئية استطاعت أن تزيل العقبة الكأداء فى طريق التعليل السليم . فكلما زاد التردد ν زادت طاقة الحركة $\frac{1}{2}$ ك ع^{2} . وزيادة شدة الضوء لا يصاحبها تغيير فى ν أو فى $\frac{1}{2}$ ك ع^{2} . (يلاحظ أنه ينبغى أن نفرض أن الإلكترون يمتص طاقة كمة واحدة فقط) .

وقد رفعت معادلة أينشتين الكهرضوئية نظرية الكم لبلانك إلى مرتبة القواعد الأساسية فى الفيزياء الذرية . وبالإضافة إلى ذلك ، فقد أوحت . إلى « ميليكان » بطريقة لقياس ثابت بلانك h ، وهو ثابت يضاهى فى أهميته سرعة الضوء ، ويتطرق إلى كل النظريات المتعلقة بالذرة .

٢١ — ٧ طريقة ميليكان لتعيين ثابت بلانك :

باستعمال جهاز مشابه للجهاز المبين فى شكل ٢١ — ٤ استطاع ميليكان أن يقيس كل الكميات الواردة فى المعادلة الكهرضوئية فيما عدا ثابت بلانك h ، وبذلك استطاع أن يحسب قيمته . وبكتابة معادلة أينشتين (٢١ — ٢) مرة أخرى .

$$h\nu = \text{ش}_\text{و} + \frac{1}{2}\text{ك ع}^{2} = h\nu_{\cdot} + \frac{1}{2}\text{ك ع}^{2}$$

$$\therefore h\,(\nu - \nu_{\cdot}) = \frac{1}{2}\text{ك ع}^{2} \qquad (٢١ — ٣)$$

وتردد الضوء الساقط يمكن معرفته من ثوابت المطياف (انظر بند ١٠ — ٩) وبمشاهدة الجهد المؤخر الذى يكاد يكفى لمنع الإلكترونات من الوصول إلى الكأس المجمعة يمكن الحصول على طاقة حركتها . وأخيراً بتغيير تردد الضوء بتحريك الفتحة يمكن تحديد التردد الأدنى الذى عنده ، يمتنع خروج الإلكترونات . ومن هذه البيانات يمكن حساب h . (الواقع أن التجربة أصعب كثيراً مما يوحى به هذا الوصف . وأكبر المعضلات تنشأ من صعوبة تقرير متى ينعدم التيار . ويتحتم كذلك بذل عناية خاصة للحصول على سطوح فى غاية النظافة ، وإلا حصلنا على خليط من قيم ش$_\text{و}$.) وخلاصة أبحاث ميليكان (١٩١٢) ، بالإضافة إلى أبحاث أخرى تطورت فيما بعد ، تعطينا القيمة المقبولة لثابت بلانك وهى

$$h = ٦{,}٦٢٤ \times ١٠^{-٢٧} \text{ أرج ثانية}$$

التي نادى بها بلانك . وحينما تصطدم كمة ($h\nu$) من الضوء بسطح فلز فإنه يمنح كل طاقته لإلكترون من إلكترونات المادة . وهذا بدوره ينفق هذه الطاقة فى عمليتين : (١) فى المكان الأول يلزم مقدار معين من الطاقة لانتزاع الإلكترون من بين الذرات التى سيتركها وراءه ، ومن السطح . وتسمى هذه الطاقة « بالشغل الكهرضوئى » وسنرمز لها بالرمز شء . وهى الشغل نفسه الذى مر بنا ذكره فى الانبعاث الثرميونى (بند ١٦ — ١) . ومعنى ذلك أنه فى الفلزات شء = شء (٢) أما ما يتبقى من الطاقة التى يكتسبها الإلكترون من الكمة فتظهر كطاقة حركة فى الإلكترون . ومقدارها $\frac{1}{2}$ ك ع^2 . وللتعبير عن ذلك بالرموز نكتب

$$h\nu = \text{شء} + \frac{1}{2}\text{ك ع}^2 \qquad (٢١ — ٢)$$

وبالألفاظ :

الطاقة المكتسبة من الكمة = الطاقة اللازمة للإفلات + طاقة الحركة .

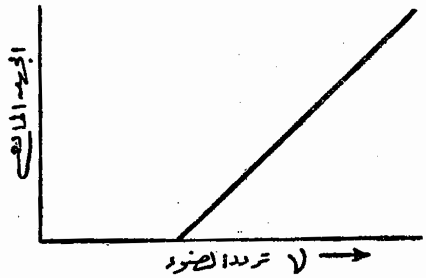
وهذه هى معادلة أينشتين الكهرضوئية المشهورة . وهى معادلة ثبت نجاحها بشكل رائع فى تفسير كافة الحقائق التجريبية التى ذكرت فى بند ٢١ — ٥ . وسنرى الآن كيف نجحت فى ذلك .

١ — النهاية الصغرى للتردد . إذا نقص التردد تقل طاقة الكمة (ش = $h\nu$) ولذا تقل طاقة الحركة للإلكترون . وحينما تؤول طاقة الحركة $\frac{1}{2}$ ك ع^2 إلى العدم ، تستهلك الكمة كلها فى مجرد إطلاق الإلكترون من الفلز . وترددالمناظر الضوءلهذه النهاية الصغرى من الطاقة هو البداية الكهرضوئية التى سبق ذكرها ، ويرمز لها بالرمز ν_0. وحينئذ فإن شء = $h\nu_0$. والكمات التى لها أى تردد ينقص عن ذلك الحد الأدنى لن تستطيع أن تحرر فوتوإلكترونات .

٢ — عدد الإلكترونات المنطلقة يتوقف على شدة الضوء . تتوقف شدة الضوء على عدد الكمات (لا طاقتها ، كما فى حالة الأمواج) . ولذا فسقوط عدد أكبر من الإلكترونات على السطح يترتب عليه انطلاق عدد أكبر من الإلكترونات ، ويكون عدد هذه الإلكترونات متناسباً مع شدة الضوء .

٣ — طاقة كل إلكترون تتوقف على تردد الضوء لا على شدته . إن المعادلة

تكون طاقة هذه الإلكترونات ٥ إلكترون فولط ، بهذه الطريقة يمكن قياس مقدار الطاقة التى يكتسبها الإلكترون من الضوء الساقط عند ما نغير كلا من شدة الضوء الساقط وتردده . وشكل ٢١ — ٥ يلخص النتائج . وقد وجد أن طاقة الالكترون لا تتعلق بشدة الضوء .



(شكل ٢١ — ٥)

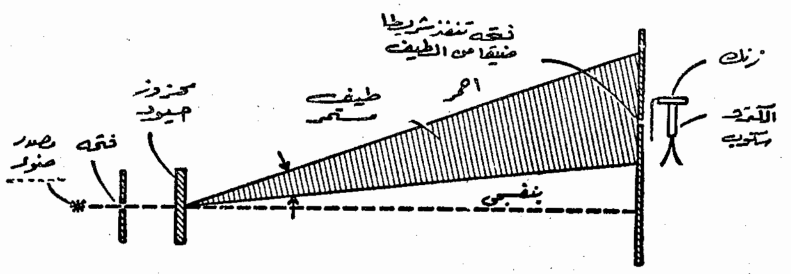
وقد وضعنا خطاً تحت هذه النتيجة الأخيرة لأن النظرية الموجية للضوءتعجز تماماً عن تعليلها . فلو تخيلنا الضوء كحركة موجية ، لوجب أن تزداد سعة الموجة وبالتالى طاقتها بازدياد شدةالضوء. فمثلا ، أمواج الصوت الصادرة من صفارة لها تردد معين تهز طبلة الأذن . وتتوقف الطاقة التى تستقبلها طبلة الأذن على سعة موجة الصوت . وكلما ازداد الصوت علواً ازادت سعة اهتزازات طبلة الأذن . وفى الواقع يمكن تمزيق طبلة الأذن إذا كانت شدة الصوت كافية . ومع ذلك فزيادة شدة الضوء تفشل فى إكساب الفوتوإلكترونات مزيدا من طاقة الحركة . وكل ما تفعله هو زيادة انطلاق الإلكترونات . أما الفوتوإلكترونات الأعلى طاقة فلا يمكن أن تنطلق إلا بزيادة تردد الضوء .

٢١ — ٦ معادلة أينشتين الكهرضوئية :

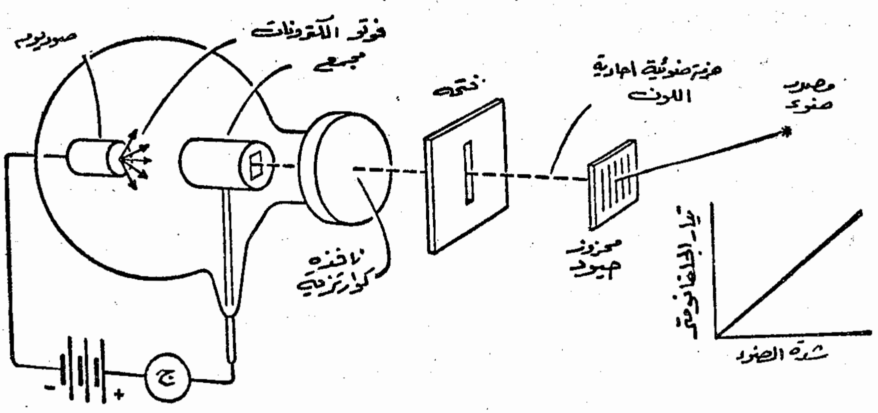
خلافاً للظن السائد ، منح أينشتين جائزة نوبل (عام ١٩٢١) على نظريته فى الظاهرة الكهرضوئية (عام ١٩٠٥) ، لا على بحثه فى النسبية . إن رجالا قلائل لهم من العبقرية ما يتيح لهم أن يضيفوا إلى العلم إضافات أساسية فى موضوعات مختلفة يكاد لا يربطها ببعضها البعض أى اتصال ، ومع ذلك ففى حالات متعددة كانت أبحاث أينشتين جديرة بجائزة نوبل .

وسنعرض تفسيره للظاهرة الكهرضوئية بصورة مبسطة . فالضوء ليس انبثاقاً مستمراً من الأمواج ولكنه يتألف من كمات من الطاقة ، هى الكمات نفسها

٣ — طاقة الحركة للفوتوإلكترونات المنطلقة من سطح معين تتوقف فقط على تردد الضوء الساقط ولا تتوقف على شدته . ولإثبات ذلك يستعمل الجهاز



(شكل ٢١ — ٣)



(شكل ٢١ — ٤)

المبين فى شكل ٢١ — ٤ على النحو التالى . نختار للضوء الأحادى اللون الساقط على السطح طولا موجيا أقصر كثيراً من قيمة البداية الخاصة بالسطح . فى هذه الحالة يلاحظ أنه حتى عندما يكون فرق جهد الكأس المجمع بالنسبة لسطح الصوديوم صفراً . فلا يزال يمر تيار كهرضوئى ، مما يدل على أن الإلكترونات قد خرجت من السطح ببعض طاقة الحركة ، ولإيجاد قيمة طاقة الحركة هذه ، يستخدم جهد « مؤخر » ، ومعنى ذلك أن نجعل الصوديوم موجباً قليلا بالنسبة للكأس المجمعة (بدلا من أن يكون سالباً كما فى شكل ٢١ — ٤) فبرفع قيمة هذا الجهد تدريجا نصل إلى حالة لا يمر فيها تيار . فإذا احتجنا مثلا إلى فرق جهد قدره ٥ لط لصد الإلكترونات عن الكأس المجمع . فلابد أن

٢١ ــ ٥ مميزات الظاهرة الكهرضوئية :

كشفت الدراسة المنتظمة للظاهره الكهرضوئية النقاب عن عدة حقائق تستحق العناية ، وهى :

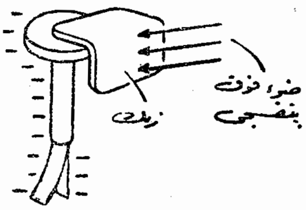
١ ــ تتميز كل مادة بوجود نهاية صغرى لتردد الضوء (أو نهاية عظمى للطول الموجى) الذى يمكنه أن يبعث بإلكترونات . تصور أن الضوء الصادر من قوس كهربى كربونى (جامد ساخن) قد تفرق إلى طيف مستمر بوساطة محزوز حيود (شكل ٢١ ــ٣) ، وأن حاجزاً به فتحة قد احتجز الطيف فلم يسمح إلا لشريط قصير من الأطوال الموجية بالسقوط على سطح من الزنك . فعند تحريك الفتحة من الطرف الأحمر للطيف إلى الطرف فوق البنفسجى ، فلن يلاحظ أى تأثير على الإلكتروسكوب حتى تصل الفتحة إلى ٣٥٠٠ أ° . وحينئذ تنطلق الفوتوإلكترونات عند ذلك الطول الموجى وعند الأطوال الموجية الأقصر منه . ويسمى أقصى طول موجى تنطلق عنده إلكترونات البداية (threshold) الكهرضوئية . وكل العناصر يحدث فيها انبعاث كهرضوئى ، ولكن كل عنصر يتميز ببداية كهرضوئية خاصة به . والعناصر الواقعة فى العمودين الأول والثانى من الجدول الدورى (وهى العناصر التى يسميها الكيميائى « بالفلزات القلوية » و « الأرضيات القلوية » على التتابع) تمتلك أكبر طول موجى للبداية ، بمعنى أنها تطلق فوتوإلكترونات ابتداء من الضوء الأحمر القاتم . وبالنسبة لهذه العناصر تعتبر الأطوال الموجية المناظرة للضوء المنظور صغيرة بدرجة كافية .

٢ ــ عدد الفوتوإلكترونات المنطلقة من سطح معين فى وحدة الزمن ، وبعبارة أخرى التيار الكهرضوئى ، يتناسب تناسباً طردياً مع شدة الضوء الساقط . ومع أن هذه الخاصية قلما تدهشنا ، فالجهاز المستعمل فى تحقيقها جدير بالوصف . ويبين شكل ٢١ ــ ٤ قطعة من الصوديوم مثبتة فى انتفاخ مفرغ من الهواء مع غرفة مجمعة . والغرض من تفريغ الهواء ضمان وصول الإلكترونات إلى المجمع بدون عائق . وعند ثبوت جهد المجمع يتناسب التيار طردياً مع شدة مصدر الضوء .

التصادمات بين الإلكترونات والكمات عام ١٩٢٣ . وبما أن هذه الأحداث تمت بصلة وثيقة إلى ما نرمى إليه من إنشاء صورة للذرة ، فسوف نبحثها بشيء من التفصيل فى هذا الفصل وفى الفصول التالية .

٢١ — ٤ ظاهرة الانبعاث الكهرضوئى :

اكتشفت ظاهرة الانبعاث الكهرضوئى (الفوتوإلكترية) على يدى هرتز عام ١٨٨٧ ، فقد لاحظ أن الشرارة الكهربية بين إلكترودين فلزيين تحدث تحت فرق جهد أقل من المعتاد إذا أضيء الإلكترودان بالأشعة فوق البنفسجية . وبعد أحد عشر عاماً نجح ج . ج . طومسون ، ب ، ليناردP. Lenard مستقلين فى إثبات أن الأشعة فوق البنفسجية إذا سقطت على سطح فلز تنبعث منه شحنات سالبة . ويبين شكل (٢١ —٢) طريقة بسيطة لتحقيق ذلك . فالإلكتروسكوب المشحون بشحنة سالبة والمتصل بصفيحة من الزنك ، يفقد شحنته رويداً رويداً



(شكل ٢١ – ٢)

طالما استمر سقوط الضوء على الصفيحة . فإذا كررنا التجربة مع شحن الإلكتروسكوب بشحنة موجبة ، فلن يحدث انكماش فى الورقتين . يستدل من ذلك على أن شحنات سالبة تنطلق بفعل الضوء من لوح الزنك (وبالتالى من الإلكتروسكوب المتصل به) إذا كان لوح الزنك سالباً . أما إذا كان اللوح موجباً فيميل بسبب التجاذب الكولومى للاحتفاظ بأى شحنات سالبة تحاول الخروج منه .

ويسمى انطلاق الشحنات السالبة من السطوح بتأثير الضوء بظاهرة الانبعاث الكهرضوئى أو الفوتوكهربية ، وتسمى الإلكترونات المنطلقة بالفوتوإلكترونات (أو الإلكترونات الضوئية) . ولم يمض وقت طويل حتى تبين أن الفوتوإلكترونات لا تختلف فى قليل أو كثير عن سائر الإلكترونات . وليس ثمة مبرر لإضفاء هذا اللقب عليها إلا لكى نشير إلى الوسيلة التى تحررت بها من الفلز .

وكأننا قد وضعنا الأمواج الكهرومغنطيسية فى فصيلة خاصة ، إذ ليس ثمة دليل على أن الأنواع المألوفة من الأمواج ، كالأمواج الصوتية والأمواج المائية ، تمتلك هذه الخاصية الجسيمية . فوتر البيانو يرسل أمواجاً مستمرة غير متقطعة ، طالما كان يتذبذب ، وتؤلف هذه الأمواج قطاراً متصلا خلال سيرها فى الهواء . أما كمة الضوء فتؤلف قطاراً محدوداً من الذبذبات . والواقع يحق لنا أن نحتار فى المعنى المقصود بكلمة « موجة » ضوئية إذا كانت مؤلفة من نبضة غير متصلة من الأمواج (أى نبضات بينها فواصل) .

وهناك ناحية أخرى فى فرض بلانك لا تقل عن ذلك صعوبة ، ألا وهى القيود المفروضة على مصدر الكمات . فالنظرية تقضى بأن الذرة لا تستطيع أن تشع أى كمية تصلها من الطاقة ، بل عليها أن تنتظر حتى تتكامل لديها كمية معينة (νh) فتشعها ولا تشع سواها . ولو استطاعت الذرة أن تشع أى كمية من الطاقة لكان من الصعب أن نتخيل بأى حال كيف يمكن أن تتكون كمة كبيرة من الطاقة (عالية التردد) . إن الفرض الكمى يفرض على الذرة فيما يظهر قواعد سلوك خاصة . ولو صدق ذلك ، لاكتسبنا منه معرفة عميقة بشأن تركيبها الداخلى . إذ أن اكتشاف القوانين التى تخضع لها مكونات الذرة يسير بنا شوطاً بعيداً نحو تكوين صورة معقولة لها . وفرض بلانك من شأنه أن يوحى بأن مكونات الذرة مقيدة فى تحركاتها بقواعد كمية ، إذ أن تغيرات الطاقة المسموح بها هى التغيرات المتقطعة المنفصلة فحسب .

ولو كان مبدأ بلانك لا يمكن تطبيقه فى ميادين أخرى غير ميدان الإشعاع من الجوامد الساخنة لما كان جديراً بالأضواء التى سلطناها عليه . فقد انقلب الحذر المقرون بالاهتمام الذى استقبل به بعض الفيزيائيين نظرية الكم . انقلب إلى إيمان بها أخذ ينتشر بسرعة فى السنوات التى تلت ظهور الدعوة إليها . وهناك ثلاثة أحداث تعتبر مسئولة إلى حد كبير عن نجاح هذه النظرية ، وهى : تطبيق أينشتين لمبدأ الكم فى نظرية ظاهرة الانبعاث الكهرضوئى (الفوتوكهربية) عام ١٩٠٥ ، وظهور نموذج بوهر الكمى للذرة عام ١٩١٣ ، ونجاح كومتون Compton فى تعليل

وتقضي النظرية أن كمية الطاقة (ش) التي تمتلكها الكمة تتناسب مع ترددها (ν) ويتبع ذلك أن كمة الإشعاع لا تمتلك طاقة محددة فحسب ، بل كذلك تتميز بتردد معين . ويمثل ثابت التناسب (في جميع المراجع) بالرمز h ، ويعرف بثابت بلانك . وعليه ، فكمة الطاقة الإشعاعية التي ترددها ν هي

ش = $h\nu$ (٢١ — ١)

ومع أن الخطوات الرياضية لبحث بلانك معقدة غاية التعقيد بحيث لا يسوغ لنا عرضها هنا ، غير أنه يمكننا إيضاح فعالية الكمة في تعليل منحنيات الإشعاع بطريقة وصفية . يتشعع من الذرة أو الجزيء كمة طاقتها ش = $h\nu$. وعليه ، فكلما قصر طول الموجة ، وبالتالي زاد التردد ، تزداد الطاقة التي ينبغي أن تمتلكها الذرة حتى يتشعع منها ذلك الطول الموجي . ولذا ، فلا يتسنى إلا لعدد صغير نسبياً من الذرات أن تشع أطوالا موجية قصيرة ، وهذا ما يفسر نقص الطاقة الذي يظهر كهبوط في المنحنى على الجانب المقابل للأطوال الموجية القصيرة من القمة . وعلى العكس ، قد يكتسب عدد كبير من الذرات طاقة تكفي لإشعاع كمة طول موجتها كبير ، ولكن طاقة هذه الكمة ليست كبيرة . لهذا يبدو من المعقول بداهة أنه عند درجة معينة من الحرارة توجد نقطة يقوم فيها التوازن بين الكمات الكبيرة الطاقة ولكنها نادرة وبين الكمات المتوسطة الطاقة ولكنها أوفر عدداً ، وهذه النقطة هي التي تحدد موضع النهاية العظمى في المنحنى . ورفع درجة الحرارة يساعد على تكوين كمات كبيرة الطاقة كما تتطلب المنحنيات.

٢١ — ٣ مقتضيات الفرض الكمي :

كان من الطبيعي أن يقبل رأي بلانك عن الكمات بحذر وتحفظ . فقد كانت نتائجه ثورية . فهو ينادي بأن الضوء يتشعع في مقادير متقطعة ، مما يحمل على القول بأن الضوء ينتقل خلال الفضاء في كمات متقطعة . ويتبع ذلك ، أن الضوء وفقاً لمبدأ الكم ، ليس تدفقاً مستمراً من الطاقة ، بل إن له تركيباً حبيبياً . فكأننا قد عزونا للضوء طابعاً جسيمياً ، ولو أن هذه الجسيمات لا تملك كتلة فيما يظهر .

٢١ ــ ٢ فرض بلانك الكمى :

كانت النظريات القديمة عن الإشعاع من الجوامد الساخنة تستند على الفرض بأن الذرات والجزيئات تتذبذب فى الجوامد فى نطاق متصل من الترددات ، فتنبعث منها أمواج ضوئية مثلما تنبعث الأمواج الصوتية من عدد ضخم من الأوتار المتذبذبة المختلفة الأنغام . وفى عام ١٩٠٠ ، حاول ماكس بلانك Max Planck أن يستخدم هذا النموذج حيلة رياضية مشهورة وجوهرية فى رياضيات التفاضل والتكامل . وكانت الخطة كما يلى : أن نفرض فى بادىء الأمر أن الذرات (أو الجزيئات) لا تشع إشعاعاً متصلا ، بل تشع إشعاعاً منقطعاً يخرج فى نبضات أو نفثات منفصلة ، ثم يمكننا بعد ذلك رياضيًّا ، أن نسمح لحجم هذه النفثات المنفصلة أن يصغر شيئاً فشيئاً حتى تلتئم ويبدو تدفق الطاقة مستمرًّا كما يتطلب النموذج . والوضع هنا مماثل لتدفق الماء من صنبور . فإذا فرضنا أن الماء يخرج فى دفقات منقطعة ، ثم تخيلنا الدفقات تصغر وتتقارب من بعضها البعض فسوف نصل فى النهاية إلى حالة الانسياب المستمر الذى نشاهده فى الماء فعلا .

وكانت نتيجة هذه العملية الرياضية مذهلة . فقد وجد أنه إذا أجرينا الحسابات إلى نهايتها بالكيفية المذكورة فلن تكون النتيجة أفضل حظًّا من نتائج النظريات السابقة . ولكن بلانك لاحظ أنه إذا استبقى فكرة النبضات الإشعاعية المتقطعة ، دون أن يسمح لها بأن تصغر ، بل عزا إلى كل منها مقداراً من الطاقة يتناسب مع تردد الإشعاع ؛ فالنتيجة التى يتوصل إليها تكون سليمة وتتفق تماماً مع المنحنى التجريبى . يستخلص من ذلك أن الذرات أو الجزيئات لا تشع إشعاعاً متصلا ، بل يحدث الإشعاع فى دفقات أو نبضات لكل منها طاقة محددة . وقد أطلق بلانك على نبضة الطاقة المتقطعة لفظة كمة (جمعها كمات) ، وهو اصطلاح يقصد به كمية محددة من أى شىء ، وفى العادة أى شىء لا يقبل التجزئة . (وعلى هذا الاعتبار فالمخلوق البشرى يمثل كمة من السكان ــ إذ أنه لا توجد كسور من المخلوقات البشرية . وبالمثل ، شحنة الإلكترون تمثل كمة من الكهربا) .

أن الطول الموجى عند نقطة النهاية العظمى يتناسب تناسباً عكسياً مع درجة الحرارة المطلقة للجسم المشع ، وهى علاقة كان ڤين Vien أول من لاحظها عام ١٨٩٣ .

وتعتبر القوانين الوضعية (التجريبية) ، كقانون ڤين ، من العوامل الحافزة للأبحاث النظرية فى الفيزياء . فقد دب النشاط النظرى فى موضع الإشعاع على أثر الحصول على العلاقة البيانية — أى على المنحنيات المبينة فى شكل ٢١ — ١ . وكان السؤال الذى يتردد على الأذهان هو : أى ميكانية يمكن أن نعزوها إلى الجسم الساخن بحيث تسمح له بإشعاع طاقة تتوزع بين الأطوال الموجية على النمط الذى تشير إليه المنحنيات ؟ . أليس ثمة وسيلة للتنبؤ بهذه المنحنيات نظرياً ؟

وقد بذلت فى هذا الصدد محاولات نظرية عند نهاية القرن التاسع عشر ، بافتراض نموذج للجسم الصلب تتذبذب فيه الذرات والجزيئات بكافة الترددات وترسل أمواجاً إلكترومغنطيسية لها تلك الترددات . وقد فرض أن شدة الإشعاع للترددات المختلفة يتوقف على عدد الذبذبات عند ذلك التردد وعلى الطاقة فى كل ذبذبة . والعامل الأول يتناسب مع ν^{2} (مربع التردد) أما العامل الثانى فيتوقف على درجة الحرارة . وسوف لاندخل فى تفاصيل هذا الحساب ، ويكفى أن نذكر أنه لا يعلل منحنيات شكل ٢١ — ١ ، ولو أنه يتفق معها عند الترددات المنخفضة والمنحنى المنقط ، وهو ما سميناه ، منحنى رالى — چينز Rayleigh-Jeans (٦٠٠٠°ك) فى شكل ٢١ — ١ ، قد رسم من القانون المشتق من تلك النظرية. والنقط الجوهرية التى تستحق الملاحظة هى : أن النظرية رالى — چينز تنأى كثيراً عن التوزيع التجريبى لإشعاع الجوامد الساخنة عند الأطوال الموجية القصيرة . وأن المنحنى النظرى ليس فيه نهاية عظمى . وأسوأ ما فى الموضوع أن هذا المنحنى يرتفع إلى ما لا نهاية عند الترددات المتناهية فى العلو . ويؤخذ من هذه النقطة الأخيرة أن طاقة الإشعاع الكلية هى ما لا نهاية ، وهذا ما لا يستقيم أبداً مع المنطق . وقد ترتب على حل مشاكل الإشعاع من الجوامد الساخنة ظهور فكرة لها الآن أهمية أولية فى كل الفيزياء الذرية — ألا وهى فكرة كمة الطاقة .

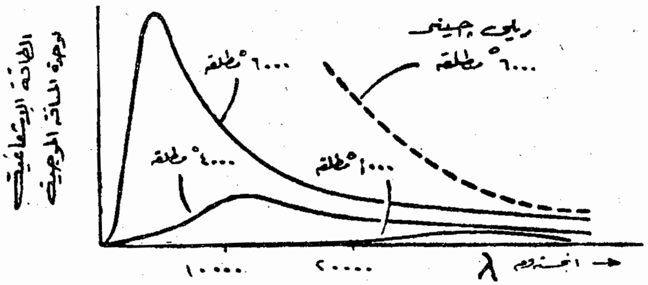
الفصل الحادى والعشرون

مولد ونمو نظرية الكم

٢١ ــ١ إشعاع الجسم الساخن :

أشرنا إلى أن موضوع إشعاع الضوء قد أدى إلى مولد نظرية الكم . ونعنى بالإشعاع هنا ، بصفة خاصة ، ما يتعلق بانبعاث الضوء من الجوامد الساخنة .

إن أوضح مظهرين من مظاهر الإشعاع من جسم صلب مسخن يمكننا أن نتبينهما على أفضل وجه بالرجوع إلى المنحنيات فى شكل ٢١ ــ ١ . أما هذان المظهران فهما وجود طيف مستمر وإزاحة النهاية العظمى للطاقة نحو الأطوال الموجية القصيرة برفع درجة الحرارة . فعند درجة ١٠٠٠° مطلقة (تسمى أيضاً درجة كلفن ،



(شكل ٢١ ــ ١)

ويرمز لها بالرمز ك) تقع النهاية العظمى للطاقة عند الطول الموجى ٢٩٠٠٠ أ° ، (فى المنطقة تحت الحمراء البعيدة) ، ولا يوجد إلا قدر يسير من الطاقة المرئية . ويبدو لون الجسم أحمر داكناً . وفى درجة ٤٠٠٠° ك تقع النهاية العظمى عند ٨٠٠٠ أ° ، وتزداد كثيراً عما قبل كمية الطاقة فى المنطقة المنظورة من الطيف . ويمكننا أن نقول إن الجسم « ساخن لدرجة البياض » ، بمعنى أنه يشع كل أطوال الأمواج المنظورة . وفى درجة ٦٠٠٠° ك ، وهى درجة حرارة سطح الشمس ، تنتقل النهاية العظمى إلى المنطقة المنظورة من الطيف عند طول موجى ٥٠٠٠ أ° ، ويصبح الجسم مصدراً متألقاً للضوء الأبيض . وقد ثبت من قياسات النهاية العظمى للطاقة ،

الفصلان السادس والسابع مناقشة عن موضوع الجاذبية فى النظرية النسبية .

EINSTEIN, A. "Relativity", London, Methuen and Co., 1920.

محاضرات عامة غير رياضية جيدة ودقيقة بالتأكيد .

EINSTEIN, A. and INFELD, L. "The Evolution of Physics", New-York, Simon and Schuster, 1938.

بحث شامل رزين عن آرائنا الفيزيائية . يحتاج إلى تمعن يستحق القراءة .

GAMOW, G. "Mr. Tompkins in Wonderland", New York, The Macmillan Co., 1940.

وصف مسل عن رجل وقع فى عالم تسوده الظواهر النسبوية .

JEANS, SIR JAMES "The Mysterious Universe", New York, The Macmillan Co., 1937.

الفصل الرابع نقاش جميل عن موضوع الأثير . الكتاب مكتوب للثقافة العامة .

٦ – يحتاج حدث معين إلى زمن قدره ٢ ميكروثانية لكى يحدث داخل ذرة . فإذا تحركت الذرة بسرعة ١٠^١٠ سم/ث فما هو الزمن الذى يقيسه راصد فى المعمل لذلك الحدث .

الجواب : ١,٨٩ ميكروثانية

٧ – ما مقدار الطاقة التى تتاح عند ما يتلاشى إلكترون (فى حالة سكون) ؟ عبر عن الجواب بالمليون إلكترون فولط .

الجواب : ٠,٥١ مليون إلكترون فولط

٨ – تبلغ الطاقة المتحررة باحتراق فحم الإنتراسين نحو ٣٠٠٠٠ جول/جم . كم مرة تبلغ طاقة الكتلة قدر طاقة الاحتراق ؟

الجواب: ٣ بلايين المرات ، أى ٣ × ١٠^٩ من المرات

مراجع مقترحة للاطلاع :

BARNETT, L. "The Universe and Dr. Einstein," New York, Wm. Sloane Associates, 1948.

عرض رائع للنواحى البسيطة فى النسبية مكتوب لغير المشتغلين بالعلم .

BERGMANN, P. G. "Introduction to the Theory of Relativity", New York, Prentice Hall, Inc., 1942.

الفصل الثالث من هذا الكتاب الدراسى الرياضى يحتوى على مقال ابتدائى جيد عن قواعد النظرية النسبية فى الظواهر البصرية . ويتناول الفصل الرابع معادلات التحول النسبوى .

DAMPIER, SIR WILLIAM, "A History of Science," New York, The Macmillan Co., 1946.

فى الصفحات ٤١٦ – ٤٢٨ نبذة تاريخية عن مواد النظرية النسبية .

EDDINGTON, SIR ARTHUR, "The Nature of the Physical World", New York, The Macmillan Co., 1929.

الفصول الأول والثانى والثالث عن أصول وطبيعة النظرية النسبية بقلم واحد من أكفأ المعلقين الشعبيين عليها .

يسترعى النظر أن فيزياء الأجرام البالغة الكبر — أى الفيزياء الفلكية — وفيزياء الجسيمات البالغة الصغر — أى الفيزياء الذرية — قد تضافرتا على خلق معالم جديدة لنظام سير العمل الفيزيائى .

تمارين :

١ — تسير طيارة بسرعة ٢٠٠ متر/ث (نحو ٥٠٠ ميل/الساعة) . وقد أطلقت رصاصة فى اتجاه سيرها . فإذا كانت سرعة خروج الرصاصة ٥٠٠ متر فى الثانية ، فأوجد سرعتها بالنسبة لراصد على الأرض . كرر الحساب إذا أطلقت الرصاصة فى الاتجاه العكسى .

الجواب : ٧٠٠ متر/ث ، ٣٠٠ متر/ث

٢ — زيدت سرعة ذرة حتى وصلت إلى $١٠^{٩}$ سم/ث ، وعند هذه اللحظة أطلقت الذرة إلكتروناً نحو الأمام بسرعة ٢ × $١٠^{١٠}$ سم / ث بالنسبة للذرة . أوجد سرعة الإلكترون كما يقيسها راصد فى المعمل باستعمال (أ) التحول الجاليلي ، (ب) التحول النسبوى .

الجواب : ٢,١٠ × $١٠^{١٠}$ سم/ث ، ٢,٠٥٥ × $١٠^{١٠}$ سم / ث

٣ — يقترب إلكترونان أحدهما من الآخر ، فإذا كانت سرعة كل منهما ٢,٥ × $١٠^{١٠}$ سم/ث فاحسب السرعة النسبية بينهما باستعمال (أ) الديناميكا النيوتنية ، (ب) الديناميكا النسبوية .

الجواب : ٥ × $١٠^{١٠}$ سم/ث ، ٢,٩٥ × $١٠^{١٠}$ سم/ث

٤ — أوجد الكتلة النسبوية لإلكترون يتحرك بسرعة ٢,٧ × $١٠^{١٠}$ سم/ث

الجواب : انظر الجدول ٢٠ — ١

٥ — طاقة إلكترون ١ مليون إلكترون فولط . أوجد كتلته النسبوية ، وأوجد كذلك سرعته .

(تلميح : مثال بند ٢٠ — ٦) .

الجواب : ٢,٩٥ مرات قدر كتلة السكون ، ٢,٨٣ × $١٠^{١٠}$ سم / ث

تبدو فيها العجلة كزيادة فى الوزن . تخيل راصداً بلغ به سوء الحظ أن حبس فى حجرة معزولة فى الفضاء الخالى ، وتدور بسرعة كبيرة . « فالجاذبية » بالنسبة إليه لا تعمل إلى « أعلى » ولا إلى « أسفل » وإنما تعمل فى اتجاه يتشعع من محور الدوران ويتجه نحو الخارج . ولو سقط منه كتاب لتحرك بعيداً عن محور الدوران ومثل ذلك الراصد يستطيع أن يثبت قانوناً « للجاذبية » يصدق تماماً على عالمه الذى يعيش فيه . ومن اعتبارات مماثلة لذلك توصل أينشتين إلى نتيجة تدعو إلى القول بأنه داخل حدود أى مجموعة (أو نظام مغلق) لا تفرق التجارب بين ما نسميه قوى الجاذبية وبين القوى « الظاهرية » الناشئة من الحركة العجلية لتلك المجموعة . ويسمى هذا الفرض – وهو القائل بأن التجارب لا تميز بين قوى الجاذبية والقوى الناشئة من عجلة المجموعة الإحداثية – يسمى بمبدأ التكافؤ . وهو دعامة النظرية النسبية العامة . ويتبع ذلك أنه يستحيل الجزم بما إذا كانت المجموعة الإحداثية مجموعة قصورية ، ولذا . فقوانين الفيزياء ينبغى أن تصاغ دون اعتبار للمجموعات القصورية . وهذه النتيجة تزعزع فلسفة الديناميكا النيوتنية ، كما حطمت النظرية الخاصة فكرة الفضاء المطلق المنبثقة من الإلكتروديناميكا المكسويلية .

بقى أن نقول كلمة تحذير لا غنى عنها . فمع أن الديناميكا النيوتنية والديناميكا النسبوية تبدوان على طرفى نقيض ، إذ تقوم الأولى على الاعتقاد بوجود مكان مطلق وزمان مطلق ، فى حين تؤكد الثانية الطبيعة النسبوية لفكرة المكان والزمان ، ومن خطل الرأى الظن بأن أعمال نيوتن وخلفائه هى مجرد أخطاء حالفها الحظ حيناً طويلا فجرت مجرى الحقائق. إن تنبؤات النظرية النسبية تعتمد على تأثير الحد (١ – ع^٢/ع^٢) أو الجذر التربيعى له . والواقع أن اختلاف ذلك الحد عن الوحدة لا يظهر إلا فى حالات متطرفة جداً فى الفيزياء الفلكية والفيزياء الذرية . والديناميكا النيوتنية تخدمنا بكفاءة وإخلاص فى ميدان الظواهر الماكروفيزيائية . وقد بينت النظرية النسبية أن الديناميكا النيوتنية تقريب للقوانين الصحيحة . ولا يتأتى لنا أن نكشف عن إخفاق النظريات الكلاسيكية إلا بأبرع التجارب . ومما

طاقة مقدارها ٩ × ١٠^٢٠ أرج = ٩ × ١٠^١٣ جول = ٢٥ مليون كيلواط ساعة. وهو مقدار من الطاقة لو زودنا به مولداً مائيًّا كبيراً للكهرباء لاستطاع أن يمدنا بقدرة كهربية تكفينا لمدة ٥٠٠ ساعة. وهى طاقة تكفى لتموين طائرة ذات أربعة محركات من عابرات المحيط لمدة نحو ٤٠٠٠ ساعة.

أخيراً، ينبغى أن ندرك أن نظرية النسبية لم تخبرنا كيف يتأتى لنا أن نجعل طاقة الكتلة هذه متاحة فى صورة أخرى، إلا أنها بينت لنا أن هذه العملية طبيعية ومعقولة، كما أنها أمدتنا بعامل التحويل ع^٢ بين الكتلة والطاقة، وأزاحت النقاب عن الظروف التى يكون فيها التحويل كبيراً بحيث يمكن قياسه.

٢٠ — ٨ نظرية النسبية العامة

شرحنا فى البنود السابقة بطريقة وصفية بعض معالم نظرية النسبية الخاصة التى أعلنها أينشتين عام ١٩٠٥ (فى سن السادسة والعشرين.) وقد سميت بالنظرية «الخاصة» لأنها تنطبق فقط على المجموعات المتحركة بسرعة ثابتة، وبعبارة أخرى على المجموعات القصورية. وفى الأحد عشر عاماً التالية نجح أينشتين فى توسيع آفاق النظرية بحيث تشمل المجموعات المستعجلة (أى المتحركة بعجلة)، فبزغت من ذلك نظرية النسبية العامة. والتعقيدات الرياضية فى هذه النظرية كثيرة، إذ أن تحولات الفضاء ذى الأربعة أبعاد الذى يصف الحركة — وهى ثلاث إحداثيات مكانية يضاف إليها إحداثى زمانى — تحتاج إلى نوع خاص من الحساب الرياضى يعرف بالتحليل الممتدى Tensor. وقد طبقت نتائج هذه النظرية بصفة خاصة فى الظواهر الفلكية، وقد أيدت المشاهدات تنبؤاتها فى عدة حالات وأهم نتائج لنظرية النسبية العامة هى ذلك الضوء الجديد الذى ألقته على الآراء المتعلقة بقوى الجاذبية.

من المعلوم نتيجة لخبرتنا العادية أن راكب المصعد الذى يرتفع بعجلة يخالجه شعور بازدياد الثقل. وقائد الطيارة المرتفعة عقب حركة انقضاض يحس بأن جسمه يضغط على المقعد بما يوازى عدة أضعاف ثقله المعتاد. وليست هذه إلا أمثلة

مثال ١ : رصاصة كتلتها ١٠٠ جم وسرعتها ٤ × ١٠^٤ سم/ث . فإذا تحولت كل طاقة حركتها إلى طاقة كتلة ، فماذا تكون الزيادة فى كتلتها ؟

$$\text{طاقة الحركة} = \tfrac{1}{2} \text{ك ع}^{2} = \tfrac{1}{2} \times ١٠٠ \times (٤ \times ١٠^{٤})^{2} = ٨ \times ١٠^{١٠} \text{ أرج}$$

$$\text{زيادة الكتلة} = \frac{\triangle \text{ش}}{\text{ع}^{2}} = \frac{٨ \times ١٠^{١٠}}{٩ \times ١٠^{٢٠}} = ٨,٩ \times ١٠^{-١١} \text{ جم}$$

وواضح أن هذه الزيادة فى الكتلة يتعذر قياسها تماماً ، لمجرد أن طاقة حركة الرصاصة ٨ × ١٠^١٠ أرج فى حين أن طاقة السكون هى

$$\text{ك}_{\circ} \text{ع}^{2} = ١٠٠ \times ٩ \times ١٠^{٢٠} = ٩ \times ١٠^{٢٢} \text{ أرج}$$

وبخلاف ديناميكا الأجسام الكبيرة ، فالجسيمات الذرية والنووية تمتلك غالباً طاقات حركة قد تصل فى الكبر إلى طاقات السكون وربما تزيد عنها ، والتفاعلات بين هذه الجسيمات كثيراً ما يترتب عليها استهلاك جانب كبير من طاقات حركتها ، ولذا تتغير كتلة السكون بنسبة يمكن قياسها .

مثال ٢ : الإلكترون الذى طاقته ٠,٢٠٤ مليون إلكترون فولط (انظر الجدول ٢٠ — ١) تبلغ طاقة حركته ٣,٢٦ × ١٠^-٧ أرج ، وتبلغ طاقة السكون ٨,٢٠ × ١٠ ^٧ أرج . فإذا تحولت طاقة حركته إلى طاقة كتلة تزيد كتلته بمقدار

$$\triangle \text{ك} = \frac{\triangle \text{ش}}{\text{ع}^{2}} = \frac{٣,٢٦ \times ١٠^{-٧}}{٩,٠٠ \times ١٠^{٢٠}} = ٣,٦٢ \times ١٠^{-٢٨} \text{ جم}$$

∴ الزيادة المئوية للكتلة هى

$$\frac{٣,٦٢ \times ١٠^{-٢٨}}{٩,١١ \times ١٠^{-٢٨}} \times ١٠٠ = ٤٠\%$$

والعمليات العكسية التى تنطلق فيها الطاقة على أثر نقص كتلة السكون لسرب من الجسيمات قد تفوق فى الأهمية العمليات التى تزيد فيها كتلة السكون على أثر امتصاص طاقة حركة . فهنا تكون الطاقة المحررة مساوية التغير فى الكتلة مضروباً فى عامل كبير هو مربع سرعة الضوء ، ولذا تكون التغيرات فى الطاقة كبيرة جداً بالنسبة للمعايير المعتادة . فمثلا لو نقصت كتلة السكون بمقدار جرام واحد تنطلق

وليس هذا الإجراء عبثاً ، إذ أنه فى بعض العمليات وجد أن التغيرات فى كتلة السكون يصاحبها تغيرات مكافئة فى طاقة الحركة . (حتى عند ما تكون السرعة ع كبيرة بحيث لا يسوغ استعمال مفكوك ذات الحدين ، يظل الشرح صحيحاً) . وكان يمكن اتباع الإجراء نفسه فى فيزياء ما قبل النسبية ، ولو أنه لم يكن فى الحقيقة يوجد آنئذ دليل يمكن به تقدير طاقة السكون . والنقطة الجوهرية أن تغيرات فى الطاقة تعزى مباشرة إلى تغيرات فى طاقة السكون قد شوهدت فعلا ووجد أنها تتفق فى المقدار مع قانون النسبية . وهذا الاتفاق هو مظهر مباشر للتحولات النسبوية وللديناميكا النسبوية التى نتجت منها .

وبالرموز الرياضية ، الطاقة النسبوية الكلية هى

$$ش = \text{طاقة الحركة} + ك_{.}\, ع^{2}$$
$$= طح + ك_{.}\, ع^{2}$$

فإذا كان مبدأ بقاء الطاقة سارى المفعول فى إحدى العمليات ، ولكن طاقة الحركة تتحول إلى طاقة كتلية ، فإن

$$\overline{ش} = ش = \overline{طح} + \overline{ك_{.}}\, ع^{2} = طح_{.} + ك_{.}\, ع^{2}$$

وقد استعملت خطوط فوق بعض الرموز للدلالة على الكميات التى قيست عقب العملية . وينتج مما تقدم أن

$$طح - \overline{طح} = (\overline{ك_{.}} - ك_{.})\, ع^{2}$$

فالنقص فى طاقة حركة الجسم إذن = (الزيادة فى كتلة السكون) $\times$ ع^{2}

أى أن $\qquad \triangle ش = (\triangle ك)\, ع^{2}$ $\qquad$ (٢٠ — ٢٣)

حيث يدل الرمز $\triangle$ أمام كمية على « التغير فى » تلك الكمية . ومن ذلك نرى أهمية طاقة السكون ك.ع^{2} المعزوة إلى كل جسيم .

وفى الديناميكا المعتادة للأجسام الكبيرة تكون التغيرات فى كتلةالسكون طفيفة جداً . لأن طاقة الحركة لجسم له سرعة فى الحدود المألوفة تكون أصغر كثيراً من طاقة السكون لذلك الجسم، وأى تغيرات فى الكتلة تكون من الضآلة بحيث لا يمكن قياسها .

وإذا $\frac{ك}{ك_.} = \frac{١٢,٨ \times ١٠^{-٢٨}}{٩,١١ \times ١٠^{-٢٨}} = ١,٤٠$

أى بزيادة ٤٠٪ فى الكتلة عن كتلة السكون (انظر الجدول ٢٠ — ١) .

ويمكن الحصول على سرعة الإلكترون من

$$ش = ١١,٥ \times ١٠^{-٧} = \frac{ك_. ع^٢}{\sqrt{١ - ع^٢ \backslash ء^٢}}$$

$$\therefore ١ - \frac{ع^٢}{ء^٢} = \left(\frac{٨,٢٠ \times ١٠^{-٧}}{١١,٥ \times ١٠^{-٧}}\right)^٢ = (٠,٧١٣)^٢ = ٠,٥١$$

$$\therefore ع = ء \sqrt{٠,٤٩} = ٢,١ \times ١٠^{١٠} \text{ سم/ث}$$

٢٠ — ٧ تكافؤ الكتلة والطاقة :

نعلم من دراستنا فى الديناميكا الكلاسيكية أن الطاقة الديناميكية الكلية لجسيم تتألف من مجموع حدين هما طاقة الحركة وطاقة الوضع . فإذا بذل شغل على جسيم حر ، باستعجاله مثلا على امتداد مستوى أفقى أملس ، فلا تتغير إلا طاقة حركته ، فى حين أنه تحت ظروف أخرى قد لا يؤدى الشغل إلا إلى تغيير طاقة الوضع . وفى أى الحالات ، لا يمكننا أن نقيس إلا التغير فى الطاقة ، وإذن فليس ثمة ما يمنعنا من أن نعزو دائماً للجسم وجود مقدار ثابت من نوع الطاقة الافتراضية بالإضافة إلى طاقة حركته وطاقة وضعه ، إذ أن الطاقة الافتراضية تختزل ولا يظهر أثرها عندما نقيس تغيرات فى الطاقة . ومع ذلك فلا جدوى من هذه العملية ما لم يكن فى الاستطاعة تحويل هذا النوع الجديد من الطاقة إلى طاقة ديناميكية فى بعض الأحوال . فمثلا يمكننا أن نقول إن الحجر الساقط يمتلك طاقة حرارية بالإضافة إلى طاقته الديناميكية ، إذ أن هذه الطاقة الحرارية يمكن أن تزداد على حساب طاقة الحركة حينما يصطدم الحجر بالأرض .

وقد ظهر من النظرية النسبية أنه ينبغى أن نعزو طاقة كتلة السكون لجسيم .

$$\therefore \text{ش} = \text{ك}_\text{.}\,\text{ع}^{٢} + \frac{١}{٢}\,\text{ك}_\text{ م}\,\text{ع}^{٢} \qquad (٢٠ - ٢١)$$

والحد الثانى فى النتيجة الأخيرة هو نفسه طاقة للحركة الكلاسيكية للجسيم . إلا أن القانون النسبوى ينبئ بأنه حتى لو كانت طاقة الحركة (الكلاسيكية) صفراً ، فالجسيم يمتلك طاقة متبقية مقدارها ك. ع^{٢} . وتسمى هذه الطاقة بطاقة السكون أو طاقة الكتلة للجسيم . وتعتبر المعادلة .

$$\text{طاقة الكتلة} = \text{ك}_\text{.}\,\text{ع}^{٢} \qquad (٢٠ - ٢٢)$$

من أهم النتائج المستخلصة من النظرية النسبية الخاصة . وسوف نكرس البند التالى للتعقيب عليها .

مثال : اعتبر إلكتروناً استعجل إلى سرعة عالية بوساطة مجال كهربى بين لوحين . افرض أن فرق الجهد بين اللوحين ٢,٠٤ × ١٠^{٥} فولط ، فتكون طاقة الإلكترون ٠,٢٠٤ مليون إلكترون فولط . الشغل المبذول على الإلكترون لا يزال س ح فى ضوء النظرية النسبية ، وإذن فطاقة حركة الإلكترون هى :

$$\text{ش ح} = \frac{(٤,٨ \times ١٠^{-١٠}) \times (٢,٠٤ \times ١٠^{٥})}{٣٠٠} = ٣,٢٦ \times ١٠^{-٧} \text{ إرج}$$

والطاقة النسبوية الكلية هى :

$$\text{ش} = \text{س ح} + \text{ك}_\text{.}\,\text{ع}^{٢}$$

$$= (٣,٢٦ \times ١٠^{-٧})$$

$$+ (٩,١١ \times ١٠^{-٢٨}) \;\; (٩,٠٠ \times ١٠^{٢٠})$$

$$= ١١,٥ \times ١٠^{-٧}$$

وكتلته النسبوية هى :

$$\text{ك} = \frac{\text{ش}}{\text{ع}^{٢}}$$

$$= \frac{١١,٥ \times ١٠^{-٧}}{٩,٠٠ \times ١٠^{٢٠}} = ١٢,٨ \times ١٠^{-٢٨} \text{ جم}$$

حيث $\overrightarrow{\text{ع}}$ السرعة المتجهة للجسم. وبهذا التعريف لكمية التحرك ينطبق مبدأ بقاء كمية التحرك على كل المجموعات القصورية ، بغض النظر عن حركاتها النسبية هذا ما يتطلبه الفرض الأول فى النسبية الخاصة .

وقد آمن أينشتين كذلك بمبدأ بقاء الطاقة . والفرض الأول فى نظريته يستلزم أنه إذا كان الراصد فى مجموعة إحداثية قد وجد أن سرباً معيناً من الجسيمات له طاقة ديناميكية ثابتة ، فالراصدون فى كافة المجموعات القصورية الأخرى يجدون النتيجة نفسها . (ويمكن تعميم المبدأ بحيث يشمل كل صور الطاقة) . وقد اشتقت من النظرية النسبية التحولات اللازمة لحفظ الطاقة . وأهم نتيجة تعنينا فى هذا الموضوع تنحصر فى القانون الجديد المستعمل فى حساب الطاقة الديناميكية ، ألا وهو ، أن الطاقة ديناميكية تساوى حاصل ضرب الكتلة النسبوية للجسيم فى مربع سرعة الضوء .

$$\text{ش} = \text{ك}\ \text{ء}^{٢} = \frac{\text{ك}_{.}\ \text{ء}^{٢}}{\sqrt{١ - \text{ع}^{٢} \backslash \text{ء}^{٤}}} \qquad (٢٠ - ٢٠)$$

وفى أغلب الأجسام تكون السرعة ع صغيرة بالمقارنة بسرعة الضوء ، وعليه ، فالكمية $\text{ع}^{٢} \backslash \text{ء}^{٢}$ تكون صغيرة إذا قورنت بالوحدة . وتسمح لنا نظرية ذات الحدين* فى الرياضة بأن تجرى عملية التقريب الآتية متى كانت السرعة ع صغيرة .

$$\frac{١}{\sqrt{١ - \text{ع}^{٢} \mid \text{ء}^{٢}}} = ١ + \tfrac{١}{٢}\ \text{ع}^{٢} \mid \text{ء}^{٢} + \text{حدود يمكن إهمالها .}$$

وينتج من ذلك أن الطاقة

$$\text{ش} = \text{ك}_{.}\ \text{ء}^{٢} \ / \ \sqrt{١ - \text{ع}^{٢} / \text{ء}^{٢}} = \text{ك}\ \text{ء}\ (١ + \tfrac{١}{٢} \text{ع}^{٢} \backslash \text{ء}^{٢} + \cdots)$$

* نظرية ذات الحدين : $(١ + \text{س})^{\text{ن}} = ١ + \text{ن س} + \frac{\text{ن}(\text{ن} - ١)}{٢} \text{س}^{٢} + \cdots$

مثال : اعتبر إلكتروناً يتحرك بسرعة ١,٥٠ × ١٠^١٠ سم/ث . فحينئذ ، ع\ء = $\frac{1}{2}$ ، والكتلة النسبوية

$$ك = \frac{ك_{\cdot}}{\sqrt{١ - ١ \backslash ٤}} = \frac{ك_{\cdot}}{\sqrt{٣} \backslash ٤} = ١,١٥ ك_{\cdot} .$$

أى أن كتلته تزداد بمقدار ١٥ ٪ عن كتلة السكون . وتزداد هذه النسبة بطبيعة الحال كلما اقتربت سرعة الإلكترون من سرعة الضوء . ويلخص الجدول ٢٠ — ١ نتيجة هذا الحساب وحسابات مماثلة ، كما يضم أيضاً طاقات الإلكترون .

٢٠ — ٦ بقاء كمية التحرك والطاقة فى النظرية النسبية :

لقد وضعت فى الديناميكا تأكيدات جمة لصحة قانونى بقاء كمية التحرك والطاقة الديناميكية ، تحملنا على الاطمئنان إلى تطبيقهما . وتعترف النظرية النسبية بالدلائل التجريبية العديدة التى تؤيد هذين القانونين ، ولكنها بينت أن الطريقة المتبعة فى حساب كمية التحرك والطاقة الديناميكية ينبغى أن تعدل بعض التعديل حتى تستمر صحة القانونين . ولكى يستمر سريان مبدأ بقاء كمية التحرك يتحتم أن نعرف كمية التحرك النسبوية كحاصل ضرب الكتلة النسبوية . فى السرعة وكما فى حالة الديناميكا النيوتنية ، كمية التحرك النسبوية هى كمية متجهة ، تتعين من

$$\mu = ك \vec{ع} = \frac{ك_{\cdot}}{\sqrt{١ - ع^{٢} \backslash ء^{٢}}} \vec{ع} \qquad (٢٠ - ١٩)$$

فكرة المعارضة لتغير الحركة كوصف للكتلة حيث كانت الفكرة تخدم غرضنا . وتسمى تلك المعارضة لتغير الحركة بالكتلة القصورية . وتنبئنا النظرية النسبية بأن هذه المعارضة تزداد بازدياد السرعة . وإذا لجأنا إلى ذلك الوصف الغامض الدائرى للكتلة ، الذى لجأ إليه فيزيائيو القرن الثامن عشر ، ألا وهو « كمية المادة » ، لما اكتسبنا من ذلك شيئاً . هل يمتلك الإلكترون العالى السرعة من المادة أكثر مما يمتلك الإلكترون البطىء ؟ إن السؤال هراء لا يحمل معنى لأننا عاجزون عن تعريف المادة . وتقول النظرية النسبية بكل بساطة إن استعجال إلكترون سريع بعجلة معينة يحتاج من القوة أكثر مما يحتاج إليه إلكترون بطىء .

الجدول ٢٠ — ١

الزيادة النسبوية لكتلة الإلكترونات السريعة

سرعة الإلكترون	٪ من سرعة الضوء	٪ زيادة الكتلة	طاقة الحركة بالإلكترون فولط
$٣,٠ \times ١٠^{٨}$ سم/ث	١	٠,٠٠٥	٢٥,٠
$٣,٠ \times ١٠^{٩}$	١٠	٠,٥٠	$٢,٥٧ \times ١٠^{٣}$
$٩,٠ \times ١٠^{٩}$	٣٠	٥,٠	$٢,٤٧ \times ١٠^{٤}$
$١,٥ \times ١٠^{١٠}$	٥٠	١٥,٠	$٧,٩٠ \times ١٠^{٤}$
$٢,١ \times ١٠^{١٠}$	٧٠	٤٠,٠	$٢,٠٤ \times ١٠^{٥}$
$٢,٧ \times ١٠^{١٠}$	٩٠	١٢٩,٠	$٦,٦١ \times ١٠^{٥}$
$٢,٩٧ \times ١٠^{١٠}$	٩٩	٦٠٩,٠	$٣,١٢ \times ١٠^{٦}$

٢٠ ـ ٥ الكتلة النسبوية :

إن قانون نيوتن الثانى فى الحركة ، وهو الذى يدخل إما صراحة وإما ضمناً فى كافة نواحى الفيزياء الكلاسيكية تقريباً ، ليبدو الآن خاطئاً إذا طبقناه على نظام يتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء . فبمقضى القانون الثانى ، إذا أثرت قوة ثابتة على جسم ولدت فيه عجلة ثابتة ، وما دام استمر تأثير القوة تزداد سرعة الجسم دون أن تقف هذه الزيادة عند حد . ويتبع ذلك أن سرعة الجسم يمكن أن تزيد عن سرعة الضوء ، الأمر الذى يتعارض تماماً مع النظرية النسبية . يؤخذ من ذلك أنه لابد أن تتزايد الصعوبة فى استعجال كتلة ما كلما اقتربت سرعتها من من سرعة الضوء . وتسمى خاصية كل المواد فى معارضة التغير فى الحركة بالقصور الذاتى (الكتلة) . ويوحى التحول النسبوى للسرعة بأن كتلة الجسم لابد أن تزيد كلما زادت سرعته .

وقد بحثت النظرية النسبية هذا الاستدلال بحثاً كمياً تبين منه أن كتلة الجسم المتحرك بسرعة ع هى

$$ك = \frac{ك_{.}}{\sqrt{١ - ع^{٢} \backslash ء^{٢}}} \qquad (٢٠ - ١٨)$$

حيث ك . كتلة الجسم إذا كانت سرعته صفراً، أى كتلة السكون . وجلى أنه إذا كانت ع = ء فإن ك = ∞ . ويؤخذ من ذلك أنه لكى نحرك جسما بسرعة الضوء ، لابد لنا من قوة لانهائية فى الكبر ، إذ أن كتلة الجسم حينئذ تكون لانهائية فى الكبر . وقد تحققت هذه النبوءة النسبوية تحقيقاً كافياً فى قياسات الشحنة النوعية $\frac{س}{ك}$ للإلكترونات السريعة . وقد وجد أن كتلة الإلكترون ك تتغير بتغير سرعته وفقاً للمعادلة (٢٠ ـ ١٨) . وتسمى كتلة الجسم المتحرك بالكتلة النسبوية . ومنشأ الصعوبة فى تكوين صورة لزيادة الكتلة مع السرعة يأتى مباشرة من عجزنا عن تعريف الكتلة . ففى الديناميكا الكلاسيكية قنعنا بقبول

وبحل هذه المعادلة الأخيرة بالنسبة إلى ع نجد أن

$$ع = \frac{عَ + عً}{١ + عَ عً \backslash ء^٢} \qquad (٢٠ - ١٧)$$

وتعطى المعادلات (٢٠ — ١٦) ، (٢٠ — ١٧) التحولات النسبوية للسرعة ، ولهذه المعادلات نتائج طريفة .

١ — يلاحظ أن ع أقل من عَ + عً. وهذا ما ينبغي أن يكون ، إذ لو كانت عَ هى سرعة موجة ضوئية فى المجموعة مَ ، بمعنى أن عَ = ء ، لوجب أن تكون سرعة الموجة ء أيضاً فى المجموعة م . وبوضع عَ = ء فى المعادلة (٢٠ — ١٧) نجد أن

$$ع = \frac{ء - عً}{١ + ء عً \backslash ء^٢}$$

$$= \frac{ء(١ + عً \backslash ء)}{١ + عً \backslash ء} = ء$$

وهو ما يؤيد هذا القول .

٢ — يلاحظ أيضاً من المعادلة (٢٠ — ١٧) أنه إذا كانت سرعة جسيم مقيسة فى إحدى المجموعات الإحداثية أقل من سرعة الضوء ء ، فالسرعة مقيسة فى أى مجموعة أخرى هى أيضاً أقل من ء . وذلك لأننا لو جعلنا عَ = ٠,٩٩ ء , عً = ٠,٩٩ ء فالمحصلة

$$عَ = \frac{٠,٩٩ ء \times ٠,٩٩ ء}{١ + \frac{(٠,٩٩ ء)^٢}{ء^٢}} = \frac{١,٩٨٠٠}{١,٩٨٠١} ء = ٠,٩٩٩٩٥ ء$$

النسبية لمسطرة القياس أو للساعة إزاء الراصد . وهى تسرى بحذافيرها إذا اعتبرنا المسطرة ساكنة فى المجموعة م ، والساعة مثبتة فى المجموعة مَ .

٢٠ ـ ٤ الإضافة النسبوية للسرع المتوازية :

إن انكماش مساطر القياس المتحركة وإبطاء الساعات المتحركة، يمليان علينا بعض التعديلات فى الإضافة الجاليلية للسرع . افرض مثلا أن جسما يتحرك فى اتجاه + سَ بسرعة عَ كما تقاس فى المجموعة مَ ، شكل ٢٠ ـ ١ . يقصد بذلك أنه ينتقل من $سَ_١$ إلى $سَ_٢$ فى الفترة الزمنية بين $ةَ_١$ ، $ةَ_٢$. والسرعة التى يقيسها راصد فى المجموعة م هى ، بموجب تعريفها ، المسافة ($س_٢ - س_١$) مقسومة على ($ة_٢ - ة_١$) ، حيث الإحداثيات المكانية س ، والإحداثيات الزمانية ة ، هى القيم المحولة للمشاهدات الجارية فى المجموعة م ، ولو انتهجنا المنهج المألوف فيما يتعلق بمفهوم المكان والزمان كما يعبر عنه التحول الجاليلى فى المعادلة (٢٠ ـ ٧)، لكانت السرعة كما تشاهد فى المجموعة م هى ع = عَ + عَ . إلا أن هذا القانون لا يسرى فى معايير النظرية النسبية . وباستعمال معادلات التحول النسبوية (٢٠ ـ ١٠) ، (٢٠ ـ ١٣) نجد من تعريف السرعة فى المجموعة م أن

$$عَ = \frac{(س_٢ - س_١) - عَ\,(ة_٢ - ة_١)}{(ة_٢ - ة_١) - \frac{عَ}{ء^٢}(س_٢ - س_١)}$$

وبقسمة البسط والمقام على ($ة_٢ - ة_١$) ، ووضع $ع = \frac{س_٢ - س_١}{ة_٢ - ة_١}$

نجد أن

$$عَ = \frac{ع - عَ}{١ - ع عَ \backslash ء^٢} \qquad (٢٠ - ١٦)$$

$$= \bar{\text{ل}} \sqrt{1 - \text{ع}^2 \backslash \text{ء}^2} \qquad (٢٠ - ١٤)$$

ولما كانت ل أقل من ل َ، فالمعادلة (٢٠-١٤) تنص بأن المسطرة إذا قيست بوساطة راصد يتحرك بالنسبة إليها ، فطولها يبدو أقل مما يبدو لراصد فى حالة سكون بالنسبة إليها . ويؤخذ من المعادلات (٢٠ - ١١) ، (٢٠ - ١٢) أن أبعاد المسطرة فى الاتجاه العمودى على اتجاه حركتها ، والمقصود طبعاً هو اتجاه حركتها بالنسبة للراصد ، لا تعانى أى تغيير بسبب الحركة . وعلى العموم ، كل الأجسام تنكمش فى اتجاه حركتها إزاء الراصد بنسبة $\sqrt{1 - \text{ع}^2 \backslash \text{ء}^2}$، حيث ع السرعة النسبية للجسم .

٢ - اعتبر بعد ذلك ساعة مثبتة فى نقطة س فى المجموعة م ، وافرض أن دقاتها تفصلها فترة زمنية ($\text{ن}_2 - \text{ن}_1$) ثانية كما يرصدها مراقب فى المجموعة م . الفترة الزمنية بين الدقات كما يرصدها مراقب فى المجموعة م َ هى ($\bar{\text{ن}}_2 - \bar{\text{ن}}_1$) ثانية ، حيث باستخدام المعادلة (٢٠ - ١٣) مع وضع ع َ = ع تصبح

$$\bar{\text{ن}}_2 - \bar{\text{ن}}_1 = \frac{\text{ن}_2 - \frac{\text{ع س.}}{\text{ء}^2} - \text{ن}_1 + \frac{\text{ع س.}}{\text{ء}^2}}{\sqrt{1 - \text{ع}^2 \backslash \text{ء}^2}} = \frac{\text{ن}_2 - \text{ن}_1}{\sqrt{1 - \text{ع}^2 \backslash \text{ء}^2}} \qquad (٢٠-١٥)$$

نرى من ذلك أن ($\bar{\text{ن}}_2 - \bar{\text{ن}}_1$) أكبر من ($\text{ن}_2 - \text{ن}_1$) . وتشير المعادلة (٢٠ - ١٥) إلى أن الزمن بين الدقات أطول لراصد يتحرك بالنسبة للساعة منها لراصد ثابت بالنسبة للساعة . ويؤخذ من ذلك أنه على العموم تبطئ (تؤخر) الساعات المتحركة بنسبة $\sqrt{1 - \text{ع}^2 \backslash \text{ء}^2}$ ، حيث ع سرعة الساعة .

ومن الطريف أن نذكر أن العبارات التى تحتها خط تنطبق فى حالة الحركة

(٢٠ ــ ١٣) حجر الزاوية فى النظرية النسبية ، وتؤلف التحولات النسبوية .

وغنى عن البيان أن الفرض بأن الضوء الذى ينتقل بالسرعة نفسها فى كل المجموعات القصورية يتمشى مع النتيجة السلبية لتجربة ميكلسون ومورلى ، حيث لم تظهر إزاحة هدبية لعدم اختلاف سرعة الضوء فى اتجاهى المسارين فى الجهاز ، وبالتالى فى أى اتجاهين آخرين. بيد أن المعادلات (٢٠ــ ١٠) إلى (٢٠ ــ ١٣) تدعو إلى مفاهيم جديدة للمكان والزمان لا تخلو من الغرابة .

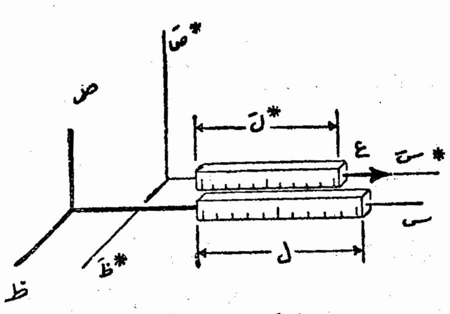
١ ــ تصور مسطرة قياس من الصلب وضعت موازية لمحور س َ، ومثبتة فى المجموعة مَ . (فحينئذ عَ = صفراً ، عَ = ع ، وهى سرعة المسطرة كما يراها راصد فى المجموعة م) . طول المسطرة كما تبدو لراصد فى المجموعة مَ هو لَ حيث

$$\text{ل}' = \text{س}'_{٢} - \text{س}'_{١}$$

، $\text{س}'_{٢}$ ، $\text{س}'_{١}$ هما إحداثيا النهايتين. لنفرض الآن أن راصداً فى المجموعة م قد قاس طول المسطرة بمقارنة نهايتها مثلا عند اللحظة ن بمسطرة فى مجموعته (شكل ٢٠ ــ ٢) . فسوف نجد أن طولها

$$\text{ل} = \text{س}_{٢} - \text{س}_{١}$$

حيث (بوضع ع = عَ فى المعادلة [(٢٠ ــ ١٠)]



(شكل ٢٠ ــ ٢)

$$\text{س}'_{٢} = \frac{\text{س}_{٢} - \text{ع}\,\text{ن}_{٠}}{\sqrt{١ - \text{ع}^{٢} / \text{ء}^{٢}}}$$

$$\text{س}'_{١} = \frac{\text{س}_{١} - \text{ع}\,\text{ن}_{٠}}{\sqrt{١ - \text{ع}^{٢} / \text{ء}^{٢}}}$$

وحينئذ $\text{ل} = \text{س}'_{٢}\sqrt{١ - \text{ع}^{٢} / \text{ء}^{٢}} + \text{ع}\,\text{ن}_{٠} - \text{س}'_{١}\sqrt{١ - \text{ع}^{٢} / \text{ء}^{٢}} - \text{ع}\,\text{ن}_{٠}$

الجاليلية ، ولنفكر بدلا من ذلك فى التحولات الآتية :

$$\text{س}' = \frac{\text{س} - \text{ع}'\,\text{ن}}{\sqrt{1 - \text{ع}'^{2} \backslash \text{ع}^{2}}} \qquad (\text{٢٠} - \text{١٠})$$

$$\text{ص}' = \text{ص} \qquad (\text{٢٠} - \text{١١})$$

$$\text{ظ}' = \text{ظ} \qquad (\text{٢٠} - \text{١٢})$$

$$\text{ن}' = \frac{\text{ن} - \frac{\text{ع}'\,\text{س}}{\text{ع}^{2}}}{\sqrt{1 - \text{ع}'^{2} \backslash \text{ع}^{2}}}$$

بالتعويض بالمعادلات (٢٠ — ١٠) ، (٢٠ — ١٣) فى المعادلة (٢٠ — ٩) نجد أن

$$\frac{\text{س} - \text{ع}'\,\text{ن}}{\sqrt{1 - \text{ع}'^{2} \backslash \text{ع}^{2}}} = \text{ع}\ \frac{\text{ن} - \frac{\text{ع}'\,\text{س}}{\text{ع}^{2}}}{\sqrt{1 - \text{ع}'^{2} \backslash \text{ع}^{2}}}$$

$$\therefore\ \text{س}\left(1 + \frac{\text{ع}'}{\text{ع}}\right) = \text{ع}\,\text{ن}\left(1 + \frac{\text{ع}'}{\text{ع}}\right)$$

$$\therefore\ \text{س} = \text{ع}\,\text{ن}$$

وهى نفس المعادلة (٢٠ — ٨) . نستنتج من ذلك أن المعادلات (٢٠ — ١٠) (٢٠—١٣) هى تحولات مناسبة تكفل لنا تساوى سرعة الضوء فى النظامين القصوريين* وببرهان مماثل يمكن إثبات أن المعادلات (٢٠ — ١١) ، (٢٠ — ١٢) تحقق مبدأ تكافؤ سرعة الضوء فى المجموعتين . وتعتبر المعادلات (٢٠ — ١٠) إلى

* يمكن ببرهان رياضى أعم من ذلك أن نثبت أن هذه التحولات هى التحولات الوحيدة الممكنة التى تساير المعادلتين (٢٠—٨) ، (٢٠ — ٩) ، وفى الوقت نفسه تحقق تكافؤ السرعة النسبية فى المجموعتين .

١ — قوانين الظواهر الفيزيائية واحدة لكل المجاميع القصورية .

٢ — سرعة الضوء فى أى مجموعة قصورية لا تتوقف على سرعة هذه المجموعة .

والفرض الثانى يعبر عن حقيقة أثبتتها التجربة . أما الفرض الأول فهو تعميم يقف على قدم المساواة مع قانون بقاء الطاقة . وهو لا يبدو من تلقاء نفسه ، ولكن ككل الفروض التى تقوم عليها نظريات الفيزياء ، يعتبر هذا الفرض حدسا إما أن يتأيد وإما أن يبطل وفقاً لما تتمخض عنه نتائجه عند ما توضع تحت الاختبار التجريبى . وبضم هذين الفرضين يمكننا أن ننشئ التحولات النسبوية بين مجموعتين قصوريتين .

ويمكن البرهنة على التحولات الجديدة باعتبار انتقال موجة ضوئية بين مجموعتين قصوريتين مع اشتراط أن سرعة الضوء المقيسة فى المجموعتين واحدة . اعتبر النظام الإحداثى نفسه المكون من المجموعتين القصوريتين المبينتين فى شكل ٢٠ — ١ ، حيث تتحرك المجموعة مَـ فى الاتجاه الموجب للمحور السينى المشترك بسرعة ع بالنسبة للمجموعة مـ ، وافرض أن مركزى الإحداثيات و ، وَ للمجموعتين ينطبقان عند الزمن ن = صفراً . فى هذه اللحظة افرض أن قمة موجة ضوئية قد انطلقت من و فى اتجاه + س . فموقعها فى النظام مـ بعد أى فترة ن هو

$$س = ء ن \qquad (٢٠ — ٨)$$

وإذا كانت سرعة الضوء هى ء أيضاً فى النظام مَـ ، فموقع قمة نفس الموجة الضوئية هو

$$سَ = ء نَ \qquad (٢٠ — ٩)$$

حيث نَ الفترة الزمنية بين لحظة انطلاق الموجة ولحظة رصدها فى المجموعة مَـ ، ولا يشترط أن تكون نَ مساوية ن . ووفقاً للتحولات الجاليليه الممثلة بالمعادلات (٢٠ — ١) ، (٢٠ — ٤) تصبح سَ = س — ع ن ، ن = نَ . ولكن يلاحظ أن هذه التحولات ، كما يجب أن نتوقع ، لا تتمشى مع المعادلات (٢٠ — ٨) ، (٢٠ — ٩) ، إذ أن الأولى تتطلب اختلاف سرعة الضوء فى المجموعتين مـ ، مَـ بسبب السرعة النسبية ، تبعا للمعادلة (٢٠ — ٧) . دعنا إذن من التحولات

وذلك من المعادلتين (٢٠ ـ ١) ، (٢٠ ـ ٤) . وبالتعويض بهذه العلاقات فى المعادلة (٢٠ ـ ٦) نجد أن

$$\text{ع} = \frac{\text{س}'_{٢} + \text{ع}'\,\text{ت}_{٢} - \text{س}'_{١} - \text{ع}'\,\text{ت}_{١}}{\text{ت}_{٢} - \text{ت}_{١}}$$

$$= \frac{\text{س}'_{٢} - \text{س}'_{١}}{\text{ت}_{٢} - \text{ت}_{١}} + \frac{\text{ع}'(\text{ت}_{٢} - \text{ت}_{١})}{\text{ت}_{٢} - \text{ت}_{١}}$$

$$\therefore \quad \text{ع} = \text{ع}' + \text{ع}' \qquad (٢٠ - ٧)$$

ومن ذلك نرى أنه بموجب التحولات الجاليلية ، تتحول السرع بمجرد إضافة (أو طرح) السرعة النسبية للمجموعتين .

ولعل نتائج هذا التحليل « واضحة من تلقاء نفسها » لكل واحد تقريباً بدون حاجة إلى العمليات الحسابية الطويلة التى أجريناها . ولقد كان الهدف الوحيد الذى نرمى إليه هو إثبات أن النتائج « الواضحة من تلقاء ذاتها » تستند على افتراض أن المسافات والأزمنة لا تتأثر بحركة الراصد . وقد كانت هذه الافتراضات التى نسميها « واضحة من تلقاء ذاتها » هى القواعد التى ترتكز عليها فيزياء ما قبل النظرية النسبية . وهى وليدة لخبرتنا العادية ، ولم يجرؤ أحد على التشكك فيها قبل النظرية النسبية .

٢٠ ـ ٣ التحولات النسبية :

بعد تأمل وتفكير فى التضارب بين الديناميكا النيوتنية وبين مقتضيات الكهروديناميكا بشأن ثبوت سرعة الضوء ، اقتنع أينشتين بتجربة ميكلسون ومورلى ، لا بوصفها مثالا للاختلاف بين انتقال الضوء وحركة الأجسام المادية ، بل كبرهان بأنه ليست هناك مجموعة قصورية مفضلة بالنسبة لأمواج الضوء . وقد وضعت النظرية النسبية الخاصة فرضين ينبنيان على التسليم بأن المجموعات القصورية كلها واحدة فيما يتعلق بانتقال الضوء . وهذان الفرضان هما :

أما الإحداثيين الآخرين فيتعينان من المعادلتين

$$ص' = ص \qquad (٢٠ - ٢)$$

$$ظ' = ظ \qquad (٢٠ - ٣)$$

(لاحظ أن الإحداثيات المكانية للنقطة ن هي (س ، ص ، ظ) فى المجموعة م ، (س' ، ص' ، ظ') فى المجموعة م') .

نرى أن المعادلات (٢٠ - ١) ، (٢٠ - ٢) ، (٢٠ - ٣) تفترض أن الأطوال المقيسة فى المجموعتين واحدة ، بمعنى أن القضيب الذى يراه الراصد فى م مترا يراه الراصد فى م' متراً أيضاً . ويعبر عن انطباق الزمن فى المجموعتين بالمعادلة

$$ن' = ن \qquad (٢٠ - ٤)$$

وتعرف المعادلات (٢٠ - ١) ، (٢٠ - ٢) ، (٢٠ - ٣) ، (٢٠ - ٤) بالتحولات الجاليلية للوضع المبين فى شكل ٢٠ - ١ .

والتحول الجاليلي للسرع من مجموعة قصورية إلى مجموعة أخرى يسير على نمط مماثل . تخيل النقطة ن تتحرك بسرعة ع' فى اتجاه + س' (الاتجاه الموجب للمحور س') كما تبدو لراصد فى المجموعة م' فمعنى ذلك أن النقطة تنتقل من $س'_١$ إلى $س'_٢$ فى الفترة الزمنية ($ن'_٢ - ن'_١$) حيث

$$ع' = \frac{س'_٢ - س'_١}{ن'_٢ - ن'_١} \qquad (٢٠ - ٥)$$

والسرعة ع كما تقاس من المجموعة م هى

$$ع = \frac{س_٢ - س_١}{ن_٢ - ن_١} \qquad (٢٠ - ٦)$$

حيث $س'_٢ = س_٢ - ع' ن_٢$

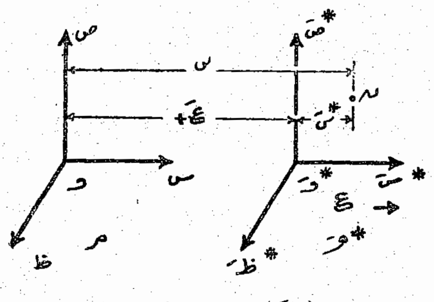
$س'_١ = س_١ - ع' ن_١$

$ن'_٢ = ن_٢$

$ن'_١ = ن_١$

٢٠ ـ ٢ التحولات الجاليلية بين المجموعات القصورية :

عند ما يرى راصدان يتحرك أحدهما بالنسبة للآخر جسيماً واحداً متحركاً ، فإنهما يعزوان إلى الجسم سرعات مختلفة ومسيرات مختلفة . وهذان الوصفان المختلفان يمكن أن يتفقا إذا ما لجأنا إلى عمل تحولات فى معادلة أحد الراصدين . وفى هذه التحولات توضع فى الاعتبار الحركة النسبية للراصدين. وقد كان جاليليو (Galileo) أول من حل مسألة تحولات الحركة من إحدى المجموعات القصورية إلى المجموعة الأخرى ، وذلك خلال بحثه فى موضوع القذائف . ولهذا السبب ، تعرف معادلات التحول بالتحولات الجاليلية ، تمييزاً لها من التحولات النسبوية التى أوجدتها نظرية أينشتين فى النسبية . وقد فرض جاليليو (كما افترضت الديناميكا النيوتنية) أن المسافة والزمن لا يختلفان بالنسبة لراصدين مهما كانت السرعة النسبية بينهما . وعلى ذلك ، فالمسطرة التى طولها متر يراها كل راصد متراً ، وعقارب الساعة الموضوعة على قطار متحرك تدور بالسرعة نفسها التى تدور بها عقارب ساعة موجودة على الأرض . ومعنى ذلك أن قياسات المسافة والزمن التى تجرى فى إحدى المجموعتين على أجسام متحركة تحملها المجموعة الأخرى تتفق مع معاييرنا المألوفة . ومن السهل أن نعبر عن هذه الآراء رياضياً باعتبار مجموعتين من الإحداثيات مـ ، مـَ تتحركان فى الاتجاه الموجب للمحور السينى بسرعة نسبية عَ . ولنفرض أن مركزى الإحداثيات فى المجموعتين ينطبقان عند الزمن



(شكل ٢٠ ـ ١)

ن = صفراً . فبعد فترة تالية تكون النقطة ن التى إحداثيها السينى س فى المجموعة مـ فى وضع إحداثية سَ فى المجموعة مـَ حيث (تبعاً لشكل ٢٠ ـ ١) .

$$\text{سَ} = \text{س} - \text{ع ن} \qquad (٢٠ - ١)$$

لو كان مسار جسم يسقط سقوطاً حرًّا . ولكن قانون الحركة واحد فى الحالتين ، وهذا كل ما نود تأكيده) .

أما فيما يتعلق بقوانين الكهروديناميكا فقد كان الأمر على نقيض ذلك . إذ نشأت الحاجة إلى نوع من الحركة المطلقة . فقد أثبت مكسويل أن الإشعاع الكهرومغنطيسى هو نتيجة الحركة العجلية لشحنة كهربية ، ومن هذه النظرية استطاع أن يتنبأ بأن سرعة الإشعاع هى ع = ٣ × ١٠^١٠ سم/ث ، وهى قيمة حققتها التجارب على وجه مرض . ولكن هذه السرعة تتوقف على الوسط الذى تسير فيه الأمواج ، ولهذا فهى ثابتة لأى وسط متجانس ، مثل الفراغ ، أى « الأثير » . ولكننا نتساءل : ثابتة بالنسبة إلى أى شيء ؟ إذا قلنا بالنسبة إلى مجموعة قصورية فالجواب ليس مناسباً ، إذ أن السرعة التى نجد أن قيمتها ع فى مجموعة ، نجد لها قيمة أخرى فى مجموعة أخرى . من أجل هذا ، افترض أن الأثير يمثل مجموعة « مطلقة » بالنسبة للحركة الموجية . ولكن تجربة ميكلسون ومورلى بينت أن سرعة الضوء واحدة ، سواء أكان الراصد يتحرك مع الضوء أو لا يتحرك معه . إن الديناميكا النيوتنية تفشل فشلا ذريعاً فى تفسير هذه النتيجة . وفى الواقع ، بموجب الديناميكا النيوتنية ، ينبغى أن تكون القوانين التى يخضع لها الإشعاع الكهرومغنطيسى متوقفة على حركة المجموعة القصورية التى تبحث فيها هذه القوانين . وأى قوانين فيزيائية أخرى تم إثباتها بالاستعانة بالقياسات الضوئية ينبغى أن تتوقف بدورها على حركة الراصد . ومعنى هذا أنه لو وجد راصد على سطح نجم لكانت قوانين الطبيعة التى يكتشفها تخالف تماماً قوانيننا المعمول بها.

وقد بذلت محاولات مختلفة لإزالة التضارب بين الديناميكا والكهروديناميكا ولكن لم يكتب لأى منها النجاح ، إذ أن كلا منها قد أدخل بدوره معضلات جديدة . وأخيراً أثبت أينشتين (Einstein) عام ١٩٠٥ أن النظريات تنسجم إذا عملت تعديلات خاصة فى الآراء التقليدية عن المكان والزمان . وقد ضمن آراءه فى نظرية النسبية الخاصة . ولكى ندرك تماماً مدى التغيير الذى أحدثته هذه النظرية دعنا أولا نفحص معنى الحركة النسبية فى الديناميكا النيوتنية .

التنبؤات التكافؤ المشهور بين الكتلة والطاقة (الطاقة = الكتلة × مربع سرعة الضوء أى ، ط = ك × ع^{٢}) .

إن التناقض المحير الذى ظهر فى موضوع انتقال الضوء فى ختام القرن التاسع عشر كان فى الحقيقة أوسع مدى وأبعد أثراً مما ذكرنا . إذ أن أصوله ترجع مباشرة إلى عجز فى أعمق جذور الآراء الفيزيائية — ألا وهى الآراء المتعلقة بالفضاء والزمان . فقد ظهر أن هذه الآراء، التى بزغت فى الديناميكا النيوتنية ، لا تصلح فى نظرية الكهربا والمغنطيسية التى نجحت فى تفسير كنه أمواج الضوء . وكل من الديناميكا والكهروديناميكا يستند على قواعد تجريبية راسخة ، ومع ذلك فقد كان فيهما عجز فى ناحية أساسية . أما هذا العجز فقد نشأ من اضطرارنا إلى أن نعزو إلى الإشعاع الكهرومغنطيسى — وخاصة ، الضوء — سرعة مطلقة .

فقد عرف منذ زمن طويل أن الحركة الديناميكية تتضمن إزاحات تحدث بالنسبة لمجموعة قصورية(المجموعة القصورية هى نظام إحداثى لا يتحرك بعجلة). وحقًّا كانت هناك صعوبة (ولو أنها كانت تغفل عادة) بصدد التحقق من كنه المجموعة القصورية ، بل لقد ظهر التباس حتى فى أعظم أبحاث الديناميكا ويقول نيوتن فى كتابه الخالد المبادئ الرياضية "Principia Mathematica" إن « الحركة المطلقة هى انتقال جسم من حيز مطلق إلى حيز آخر مطلق » ، ولكن لم يحدد ماذا يقصد بالحيز المطلق . على أن مسألة الحركة المطلقة لم تكن مصدر تعب فى الديناميكا ، إذ أن كل قوانين الحركة قد تم إثباتها بالنسبة لما يعرف بالمجموعة القصورية ، وفى هذه المجموعة وفى سائر المجموعات القصورية لا تدخل حركة المجموعة فى القوانين نفسها . فمثلا ، الجسم الساقط نحو سطح الأرض تحكمه قوة : ق = ك جـ بالنسبة للأرض . ولا يهم إن كان الجسم قد رصد من داخل قطار يسير بسرعة منتظمة أم من رصيف ثابت ، ففى كلتا الحالتين يجد الراصد أن القوة هى ك جـ . (ولا جدال فى أن مسار الحركة قد يبدو مختلفاً ، فلو أسقط الجسم من القطار ، فبالنسبة لراصد يقف على الطوار يبدو سيره (مساره) كما لو كان مسار قذيفة أطلقت أفقيًّا ، وبالنسبة لراصد راكب فى القطار يبدو كما

الفصل العشرون

ملامح النظرية النسبية

٢٠ ــ ١ أصول النظرية :

رأينا فى الفصل السابق أن مسألة انتقال الضوء قد أوقعتنا فى مشاكل محيرة فيما يتعلق بقياس سرعة **الضوء** بوساطة راصد متحرك ، وقد ذكرنا أن النظرية النسبية قد حلت الإشكال . ولكن ليس هذا بأى حال هو الفضل الأساسى لهذه النظرية التى تتأصل جذورها تأصلا عميقاً فى طبيعة العالم الفيزيائى . والواقع يتعذر تعليل سحر هذه النظرية على أساس انتصار علمى واحد .

ومن الصعب تبويب النظرية النسبية فى فرع معين من فروع علم الفيزياء . ومع أن قوانين انتقال الضوء هامة للنظرية النسبية ، إلا أن هذه النظرية لا تختص بطبيعة أمواج الضوء . وهى ليست ديناميكا ولو أنها تعالج المسائل الديناميكية . وهى لا تبحث بصفة محددة فى المسائل الذرية والنووية كما قد يتبادر إلى الذهن من شهرتها الحالية . وكل ما فى الأمر أن النظريات الكهربية والمغنطيسية تتفق تماماً مع التجارب إذا بحثت فى ضوء النظرية النسبية ، ولو أن هذا ليس إلا تطبيقاً للنظرية . وموجز القول أن النظرية النسبية تحتضن كل فروع الفيزياء ولكنها ليست فرعاً فى الفيزياء . وبعكس الموضوعات التى ناقشناها فى الفصول السابقة ، فقد نشأت النظرية لا كنتيجة لسلسلة خاصة من التجارب ولكن كنتيجة لدراسة نقدية تمحيصية لقوانين الفيزياء المعروفة وللمبادئ السائدة . فمن إحدى النواحى غيرت أهم آرائنا الأساسية فى العلوم — ونعنى بذلك فكرتنا عن الفضاء والزمن . ومع ذلك فمعادلاتها لا تناقض قوانين الديناميكا المعتادة والكهروديناميكا الكلاسيكية تحت الظروف التجريبية المألوفة . وتفسيراتها عديدة ، وأما تنبؤاتها بظواهر جديدة فقليلة ، ولكن هذه التنبؤات القليلة لها أهمية لا تقدر فى الفيزياء الحديثة . وإحدى هذه

مراجع مقترحة للاطلاع

Hecht, Selig, "Explaining the Atom", New York, Viking Press, 1947.

الفصول ٢ ، ٣ ، ٤ تستعرض التركيب الداخلى للذرة بطريقة مستساغة .

Magie, W. F. "Source Book in Physics", New York, Mc Graw-Hill Book Co., 1935.

الصفحات ٥٢٨ــ ٥٣٨ إعلان مكسويل للنظرية الالكترومغنطيسية للضوء .

Michelson, A. A. "Light Waves and Their Uses", Chicago, University of Chicago Press, 1930.

فى المحاضرة الثامنة ، يبدى المؤلف آراءه عن الأثير وانتقال الضوء قبل النظرية النسبية . ويتضح منها تعذر التوفيق بين مختلف الحقائق التجريبية .

Moulton, F. R. and Schifferes, J. J. "The Autobiography of Science", New York, Doubleday Doran and Co., 1945.

رأى هويجنز Huygens فى الأمواج والأثير سنة ١٦٩٠ .

تمارين

١ — يبلغ بعد الأرض عن الشمس ٩٣٠٠٠٠٠٠ ميل . فما هى الفترة الزمنية التى يتأخرها غروب الشمس ؟

الجواب : ٥٠٠ ثانية أى ٨,٣ دقيقة

٢ — يقيس الفلكى المسافات بالوحدة المعروفة بالسنة الضوئية . احسب عدد الأميال المناظرة للسنة الضوئية .

الجواب : ٥,٨٥ × $١٠^{١٢}$ ميلا

٣ — حاول جاليليو قياس سرعة الضوء بتوقيت رحلة الضوء بين راصدين موجودين فوق تلين . فإذا كانت المسافة الفاصلة بين التلين ميلا واحداً فما هى الفترة الزمنية التى كان يتعين عليه قياسها ؟

الجواب : ٥,٤ ميكروثانية

٤ — ما هو الزمن الذى تستغرقه موجة راديو لتنتقل من نيويورك إلى سان فرانسسكو وهى مسافة تبلغ ٢٥٨٠ ميلا ؟

الجواب : ٠,٠١٤ ثانية

٥ — أوجد تردد الضوء الأصفر الذى طول موجته ٦٠٠٠ $\mathring{A}$.

الجواب : ٥ × $١٠^{١٤}$ ذبذبة/ث

٦ — مقياس تداخل تتكون فيه هدب تداخل لضوء أحادى اللون طول موجته ٥٠٠٠ $\mathring{A}$. فإذا تحركت إحدى مرآتى المقياس مسافة ١ مم تماماً ، فما عدد الهدب التى تعبر مجال الرؤية أثناء هذه الحركة ؟

الجواب : ٤٠٠٠ هدبة

تتحرك م٢ حركة جانبية ، فيسير الضوء فى طريق قطرى بين م١ ، م٢ ويدل التحليل التفصيلى لهذين التأثيرين على أن نتيجة حركة الأرض بالنسبة للأثير هى وجود محصلة لإزاحة الهدب)* .

وقد أجرى ميكلسون ومورلى هذه التجربة ، فدلت المحاولات المتكررة على عدم وجود إزاحة هدبية . ولو اتفق من قبيل المصادفة أن كان الأثير وقت إجراء التجربة يتحرك مع الأرض بسرعتها ، لأمكن تعليل النتيجة السلبية . ولكن تجارب أخرى عن التغير السنوى فى اتجاه الضوء الواصل إلينا من النجوم البعيدة دلت على أن الأرض تتحرك فى أثير ساكن . وفى أى الحالات ، كان من الصعب الاعتقاد بأن الأثير يتحرك بالصدفة بحركتنا نفسها تماماً ، ويغير اتجاهه وقتما تغير الأرض اتجاهها أثناء حركتها المدارية فى مسارها حول الشمس . كان المعقول أن يبقى الأثير ساكناً بالنسبة لكتلة متحركة . ولكن التجربة تدل على أنه لم يسلك هذا المسلك المنتظر . وهنا جاءت اللحظة التى يجب أن يحدد فيها مصير هذا الأثير — لعله لا يوجد أثير على الإطلاق .

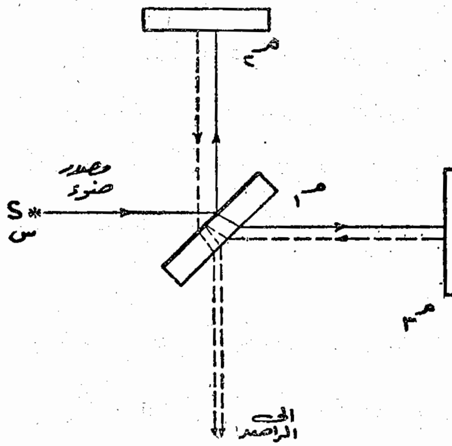
وسوف تقابلنا فى الفصل القادم بعض مفاهيم النظرية النسبية ، التى تفترض أن سرعة الضوء واحدة لجميع الراصدين ، سواء كانوا فى حالة حركة أم لم يكونوا . وانتصارات هذه النظرية مبنية على إنكار أن الحركة يمكن اكتشافها بقياس سرعة الضوء ، ومن ذلك تزول الحاجة إلى سبب وجود الأثير . ومنذ أن ظهرت النظرية النسبية لم تقم للأثير قائمة .

---

* يدل هذا الحساب على أن تأثير حركة الأرض هو زيادة طول الطريق م١ م٢ بنسبة $[\frac{١ + ع^٢}{ء^٢}]$ ، وطول المسار م١ م٣ بنسبة $[١ \pm \frac{١}{٢} \frac{ع^٢}{ء^٢}]$ ولف الجهاز يترتب عليه استبدال هذين العاملين. هنا ع هى سرعة الأرض خلال الأثير ، ء سرعة الضوء فى الفراغ .

ولنتأمل فى تأثير تحريك المرآة م ٢ موازية انفسها فى الاتجاه الذى يبعدها عن م ١. فحينئذ يزداد طول مسير الشعاع الساقط كما يزداد طول مسار الشعاع المنعكس بالمقدار نفسه، ويتبع ذلك أنه لكل مسافة طولها ربع طول موجة الضوء ($\frac{1}{4}\lambda$) تتحركها المرآة م ٢ يزداد طول المسار الكلى بمقدار نصف الطول الموجى ($\frac{1}{2}\lambda$) ، فتصبح الهدبة المركزية المضيئة هدبة مظلمة . ويستمر هذا التبدل من هدبة مضيئة إلى هدبة مظلمة لكل انتقال إضافى للمرآة م ٢ مقداره $\frac{1}{4}\lambda$.

نرى من ذلك أنه بتدريج حركة م ٢ يتسنى لنا أن نقيس طول موجة الضوء المستعمل، وبالعكس يمكننا أن نقيس حركة م ٢ بدلالة الطول الموجى للضوء . وتبلغ الدقة فى قياس الأطوال بهذه الكيفية درجة عالية جداً . ويستطيع الراصد المدرب أن يكتشف إزاحة فى الشكل الهدبى مقدارها $\frac{1}{20}$ من طول موجة الضوء .



(شكل ١٩ — ٦)

ولنفرض أن المسافتين م ١ م ٢ ، م ١ م ٣ قد ضبطتا بحيث تعطيان هدبة مضيئة (تداخلا إنشائياً) عند مركز مجال الرؤية للراصد تماماً . فإذا أدير الجهاز كله (والراصد معه) بمقدار ٩٠° ، وجب أن تلازم الهدب أماكنها لو كان انتقال الضوء لا يتوقف على الاتجاه . وعلى عكس ذلك . إذا كانت سرعة الضوء فى اتجاه الريح الأثيرى مختلفة عن سرعته فى الاتجاه العمودى عليها ، فإن استبدال المسارات الضوئية لابد أن يحدث إزاحة طفيفة فى الهدبة المركزية ، وبعبارة أخرى علينا أن نحرك إما م ٢ وإما م ٣ لتعويض التغير فى سرعة الضوء . (وينبغى أن نذكر أن صافى تأثير الحركة ، مع اتجاه الريح الأثيرى ، ثم فى الاتجاه المضاد ، ليس صفراً، لأن المرآتين م ١ ، م ٣ تتحركان أيضاً أثناء مرور الضوء بينهما . وبالمثل،

الفضاء الخالى » . وكلما دار البحث فى نظرية الأثير ظهرت فيها صعوبات جديدة . فلا بد أن يكون الأثير « مرناً » غاية المرونة حتى لا تتبدد فيه طاقة الضوء الذى ينقله ، وفى الوقت نفسه لابد أن يكون « مستقراً » حتى لا ينهار . إلا أن الضربة القاتلة التى قضت على الأثير جاءت من هذا السؤال : هل هو يتحرك ؟

إذا قذفنا بكرة ضد حركة الريح فسرعتها (الابتدائية) تنقص عن سرعة القذف ، كما أننا إذا قذفناها مع حركة الريح تزيد سرعتها . ونعود الآن لموضوعنا . فإذا كان الأثير يتخلل كل فضاء لكان علينا أن نتصوره كبحر هادىء تسير الأرض خلاله فى حركتها المدارية حول الشمس بسرعة تقرب من ٣×١٠^{٦}سم/ثانية وعليه ينبغى أن نتوقع وجود « ريح » أثيرى ضد الأرض ، والضوء المتحرك فى اتجاه مواز لحركة الأرض يبدو لراصد على الأرض أنه يسير بسرعة (٣×١٠^{١٠} — ٣×١٠^{٦}) سم/ثانية ، فى حين أن الضوء المتحرك فى اتجاه مضاد لحركة الأرض يحمله الريح الأثيرى فتزداد سرعته إلى (٣×١٠^{١٠} + ٣×١٠^{٦}) سم/ثانية . والتعيين المباشر فى سرعة الضوء ، الناشىء من « جرف » الأثير ، مسألة من الصعوبة بمكان ، ولكن أمكن ابتكار طريقة بارعة لحلها ، ولو أنها طريقة غير مباشرة ، وذلك باستعمال مقياس التداخل لميكلسون .

١٩ — ٩ تجربة ميكلسون — مورلى (Michelson-Morley) :

لاشك أن تجربة ميكلسون ومورلى التى أجريت عام ١٨٨١ تعتبر فى تاريخ الفيزياء أشهر بحث أدى إلى نتيجة سلبية . ويبين شكل ١٩ — ٦ رسماً تخطيطيا مبسطاً لمقياس التداخل الذى استعمل فى التجربة . وفيه س مصدر ضوء أحادى اللون ، $م_١$ مرآة مفضضة تفضيضاً خفيفاً على سطحها الأمامى بحيث إن أمواج الضوء الساقطة من المصدر تنفصل إلى حزمتين ، إحداهما تسير إلى المرآة $م_٢$ ، والأخرى تسير إلى المرآة $م_٣$. والمرآتان $م_٢$ ، $م_٣$ مفضضتان فتعكسان الضوء ثانية إلى $م_١$. وفى النهاية يصل جزء من كل شعاع إلى الراصد . ويحدث تداخل بين هذين الشعاعين تنشأ عنه مجموعة من الهدب المضيئة والمظلمة . لنفرض أن الهدبة الوسطى مضيئة

نسبة إلى مكتشفها) بأطياف عناصر معروفة ، يمكن معرفة تركيب بخار الغلاف الشمسى بصفة قاطعة لا سبيل إلى الالتباس فيها . وفى الواقع كان فى الطيف الشمسى فصيلة من الخطوط ظلت مجهولة الشخصية لعدة سنوات. وأخيراً استقر الرأى على أنها لابد أن تكون ناتجة من عنصر غير موجود على الأرض ، سمى « بالهليوم » (اشتقاقاً من اللفظة اليونانية هيليوس Helios بمعنى الشمس) . ولم يكتشف الهليوم فى جونا وفى الرواسب الزيتية إلا بعد ذلك . يتبين من ذلك أن الفضل يعود للسبكتر وجراف فى اكتشاف عنصر يعتبر إضافة عظيمة الأهمية للجدول الدورى للعناصر – وكان الاكتشاف على بعد ٩٣٠٠٠٠٠٠ ميل منا .

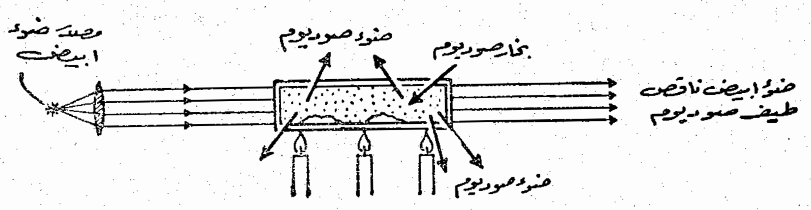
وقد عرف الآن تركيب معظم النجوم من أطيافها (ولبعضها أطياف انبعاث ، ولبعضها الآخر أطياف امتصاص) . وتدل هذه الأطياف على أن المادة النجمية تتكون من معظم ، إن لم يكن كل ، العناصر التى نعرفها على الأرض .

١٩ – ٨ الأمواج الكهرومغنطيسية والأثير :

قد لاحظنا أن انبعاث الضوء لا يمكن تفسيره على أساس النظرية الإلكترومغنطيسية فى وضعها الأول ، وسوف نرى أن تعليله يقودنا إلى نظرية الكم الحديثة . وبالمثل أدى تعليل انتشار الضوء إلى ظهور النظرية النسبية . وتطور هذه النظرية الأخيرة مرتبط بمسألة الأثير .

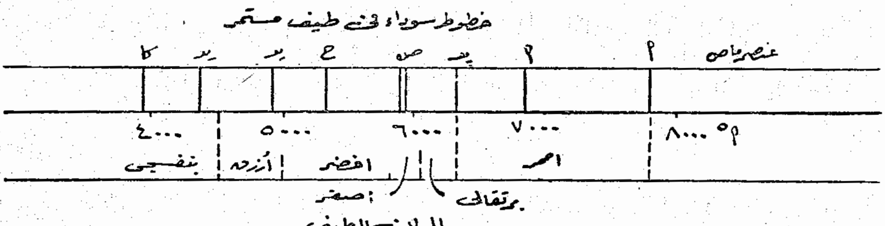
فالأثير مادة تخيلية افترض وجودها فى القرن التاسع عشر لتكون مطية أو وسطاً ناقلا لأمواج الضوء . ومما لا يحتاج إلى بيان أن الأثير لا يمكن أن تعزى إليه كتلة أو خصائص ميكانيكية بالمعنى المألوف . ويسير الضوء من النجوم إلينا ، ومع ذلك فالحركة الحرة للأجرام السماوية توحى بأنها تتحرك فى فراغ يكاد يكون تاماً . ولما كانت كل الأنواع الأخرى من الأمواج تحتاج إلى وسط ناقل ، فقد نسبت إلى الأثير المقدرة على نقل الضوء ، ولكن كما يبدو ، لم تنسب إليه خلاف ذلك أية خواص أخرى يمكن مشاهدتها والتحقق منها . وتعليقاً على طبيعته غير المألوفة ، وصف على سبيل التهكم بأنه « المتعرج » أو بأنه « ذلك الشىء الذى يتموج فى

والسؤال معقول إذا تذكرنا أن مثل هذا الامتصاص « الرنينى » يميز كل مصادر الأمواج الصوتية . (فوتر البيانو مثلا يأخذ فى الاهتزاز « التعاطفى » إذا وقعنا على مقربة منه النغمة التى يمكنه أن يطلقها لو طرقناه) . ومن السهل أن نجرى تجربة تعطينا الجواب على هذا السؤال (شكل ١٩ — ٤) . ويستدعى القيام بها



(شكل ١٩ — ٤)

وضع بخار الصوديوم فى طريق الضوء الصادر من جسم صلب ساخن . فبالفحص السبكترسكوبى للضوء ، عقب خروجه من البخار ، سنجد أن الأطوال الموجية نفسها (٥٨٩٠ أ° ، ٥٨٩٦ أ°) التى يشعها الصوديوم لو كان مضيئاً قد اختفت من الطيف المستمر للمصدر . وهذان « الخطان المظلمان » يميزان الصوديوم تماماً ، كما يميزه الخطان المضيئان فى طيف الانبعاث . ومن هذه التجربة ومن تجارب مماثلة



(شكل ١٩ — ٥)

يمكننا أن نستخلص أن : كل المواد يمكنها أن تمتص الأطوال الموجية نفسها التى تستطيع أن تشعها . وأهم مثال لطيف الامتصاص هو طيف الشمس (شكل ١٩ — ٥) ، فجوف الشمس الساخن يشع طيفاً مستمراً يحدث فى مواضع منه امتصاص بوساطة طبقات الأبخرة الأقل سخونة الموجودة فى جو الشمس الخارجى . وبمقارنة خطوط الامتصاص (وتعرف عادة بخطوط فرونهوفر Fraunhofer ،

إحدى الشحنتين تدور حول الأخرى منذ أن خلقت المادة ، وأن ذلك الدوران مستمر فى ذلك الحين ، وأن القوة المركزية الطاردة الناتجة منه توازنها القوة المركزية الجاذبة الناشئة من التجاذب الإلكتروستاتيكى . فى هذه الحالة ، وطبقاً لهذه الصورة ، سنجد أنفسنا تجاه مشكلتين بسبب دوران الشحنة ، وتظهر المشكلة الأولى حينما ندرك أن هذه الصورة لا تخلصنا من التهديد بالانهيار الذرى ، إذ أن نظرية مكسويل تتطلب سريان مبدأ بقاء الطاقة — بمعنى أن الطاقة المنبعثة كضوء لابد أن تجىء على حساب طاقة الشحنة المتحركة . وكلما مالت الشحنة المتحركة إلى التمهل والإبطاء بسبب الإشعاع زادت القوة الإلكتروستاتيكية وزاد اقتراب الشحنة من المركز . وبما أن الشحنة المتحركة فى مسار دائرى ، تسير دائماً بعجلة (هى العجلة الجاذبية نحو المركز) ، كان لزاماً أن يستمر الإشعاع منها ويستمر التناقص فى قطر مدارها ، فتسلك طريقاً حلزونيا ينتهى بها عند النواة حيث تكون خاتمتها المحتومة . ولا يستغرق حدوث هذه الكارثة إلا جزءا صغيراً من الثانية . وفى أى الحالات ، وبصرف النظر عن الانهيار ، لماذا لا يضىء الغاز من تلقاء ذاته بصفة مستمرة ، ما دامت الشحنة تتحرك فى ذراته بعجلة مستمرة ؟ أما المشكلة الثانية ، وهى ما تثير حيرتنا أكثر من ذلك . فتنحصر فى الحقيقة التى نعرفها عن أن طيف الذرات طيف متقطع ، فى حين أن الشحنة المتحركة بعجلة فى مسار حلزونى تعطى شريطاً من الطاقة المتصلة . كانت هاتان المسألتان ، وهما سير الشحنة فى طريق حلزونى نحو النواة وما يترتب على ذلك من انطلاق طيف متصل ، هما الماردان اللذان لامندوحة من التغلب عليهما عند تكوين نموذج للذرة ، وكان انهزامهما يتطلب الوسائل الجريئة التى اتبعها نيلز بوهر (Niels Bohr) عام ١٩١٣ (الفصل ٢٣) .

١٩ — ٧ أطياف الامتصاص :

قبل أن نترك مناقشة الأطياف يجدر بنا أن نلقى هذا السؤال ، يشع الغاز أطوالا موجية مميزة حينما يضىء . فهل يمتص أيضاً هذه الأطوال الموجية المميزة ؟

فلم يكن لدينا إلا بعض افتراضات قليلة بشأن التركيب الداخلى للذرة . وحقيقة أننا اضطررنا للتسليم بأن الالكترون يجيء من الذرة ، ولكن أليس من المحتمل أن يكون الالكترون كسرة أو فتاتاً من المادة الذرية ؟

إن إشعاع الضوء بوساطة الذرات فى غاز يوحى بشدة بوجود نوع من النشاط الداخلى فى الذرة . والحقيقة الصارخة بأن ذرة كل عنصر تشع تشكيلة فريدة من الأطوال الموجية التى تتميز بها هذه الذرة تماماً ، من شأنها أن تؤدى بنا إلى استخلاص أنه إذا كان للذرة تركيب داخلى ، يتحتم أن يكون ذلك التركيب مختلفاً فى الذرات المختلفة ، وتقضى نظرية مكسويل عن الأمواج الكهرومغنطيسية بأن موجة الضوء تشعها شحنة متحركة بعجلة ، ولحسن الحظ أن لدينا أدلة كافية بأن الذرة تحتوى على شحنات موجبة وشحنات سالبة معادلة لها ، إذ أنه يمكن انتزاع واحدة أو أكثر من الشحنات السالبة ، ولابد من وجود شحات موجبة لموازنة الشحنات المنزوعة . وبناء على ذلك ، ألسنا نملك بين أيدينا كل العوامل التى تفسر طيف الذرة ؟ دعنا نحاول أن نفعل ذلك .

لتوليد الضوء لابد لنا من تعجيل شحنة كهربية (وفقاً لآراء مكسويل) . تصور أننا افترضنا أن هذه الحركة العجلية تحدث باندفاع الشحنة الموجبة والشحنة السالبة فى الذرة نحو بعضهما البعض تحت وطأة القوة الإلكتروستاتيكية . إذن لوجدنا أنفسنا فى هذه الحالة إزاء ذرة متهاوية منهارة . فلو كانت الشحنة الذرية تسلك مسلك نظيرتها الماكروسكوبية لاندمجت الشحنتان تماماً وعادلت كل منهما الأخرى ولو كان هذا الاندماج يحدث فعلا لما وجدت أبداً وسيلة لفصل الشحنتين (إذ تصبح القوة الرابطة بينهما لا نهائية فى الكبر تبعاً لقانون كولوم) . وهذا يناقض ما توحى به التجارب . ولعله إذن من الأفضل أن نحاول البحث عن نظام يتضمن عجلة دون حاجة إلى اقتراب إحدى الشحنتين من الأخرى . ونحن نعرف جيداً هذا النوع من الحركة . إنه العجلة المركزية الناتجة من الحركة فى دائرة . فإذا تصورنا إحدى الشحنتين تدور حول الأخرى فالقوة المركزية الجاذبة نحو المركز إنما هى قوة التجاذب الإلكتروستاتيكى . وعلينا أن نفرض أنه بكيفية ما أخذت

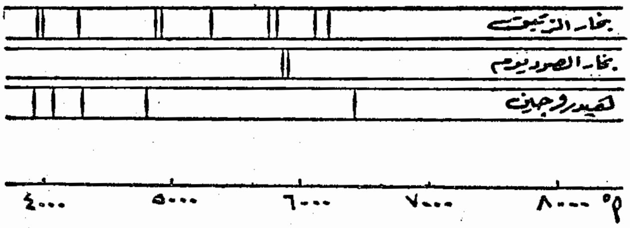
هامة سنناقش مدلولها فى الفصل القادم .

ومن مصادر الضوء الشائعة أنبوبة التفريغ الكهربى . فبينما يعطى الجسم الصلب الساخن طيفاً مستمراً ، فإن الغاز المستثار يعطى طيفاً متقطعاً ، بمعنى أن الطيف لا يحتوى إلا على أطوال موجية خاصة . ويبين شكل ١٩ — ٣ صوراً لمثل هذه الأطياف تمثل انبعاث الإشعاع من الهيدروجين والزئبق والصوديوم . وهناك عدة خصائص فى الأطياف تستحق الملاحظة . افرض مثلا أن أنبوبة التفريغ تحتوى على غاز النيون . فحينئذ تظهر عدة « خطوط » (صور للفتحة الضيقة الموضوعة أمام مصدر ضوء النيون) ، وكل خط منها يناظر طولا موجياً معيناً . وهذه المجموعة من الخطوط ينفرد بها النيون . فالهليوم مثلا يعطى مجموعة أخرى تختلف عنها تمام الاختلاف . ولا يوجد أبداً عنصران لهما الطيف نفسه . وتحتوى أطياف معظم العناصر على عدد كبير جدا من الخطوط . وهناك قلة من العناصر لها أطياف أبسط . ولعل طيف الصوديوم هو أقل الأطياف المنظورة تعقيداً ، إذ أن كل طاقته تقع فى خطين أصفرين متلاصقين ، لها الطول الموجى نفسه تقريباً . فطول موجة أحدهما ٥٨٩٠ أ° ، وطول موجة الآخر ٥٨٩٦ أ° ، ومصدر الضوء الذى تنحصر معظم طاقته فى خط ضيق من خطوط الطيف يعد مصدراً أحادى اللون تقريباً ، وضوء الصوديوم الناشئ من ذر القليل من فلز الصوديوم أو من كلوريد الصوديوم (ملح الطعام) فوق لهب غازى هو مصدر معملى شائع جداً لضوء أحادى اللون تقريباً .

١٩ — ٦ أهمية الطيف المتقطع :

يعتبر وجود مجموعة فريدة ومميزه من الخطوط الطيفية لكل عنصر مفتاحاً يرشدنا للتركيب الذرى ، ويستلزم منا اهتماماً خاصا ، ومنذ عهد النظرية الكينتيكية (نظرية الحركة) فى الغازات أخذت الأدلة تتوافر مشيرة بأن الظواهر الماكروسكوبية كثيراً ما يتأتى تعليلها بلغة الآراء الذرية . ولكن ، إلى هنا كانت التجارب التى أجريت أو الغازات التى وضعت لا تحدثنا عن الذرة إلا بوصفها تركيباً متماسكا ،

ينشأ من الدوائر الكهربية فى جهاز الإرسال . وتعليل الإشعاع أن إلكترونات الهوائى تتسارع تسارعاً دوريا فتطلق ، تبعاً لنظرية مكسويل ، أمواجاً كهرومغنطيسية بسبب عجلتها . وفى السنوات الأخيرة أمكن توليد مويجات تبلغ فى القصر بضعة ملليمترات طولا ، كما أمكن السيطرة عليها بوساطة دوائر متذبذبة ، وبذلك تم الالتحام بمنطقة الأطوال الموجية المصاحبة للمنطقة تحت الحمراء البعيدة فى الطيف البصرى .



(شكل ١٩ – ٣)

وإذا ابتدأنا من حدود الأطوال الموجية المليمترية . وتطرقنا منها خلال منطقة الطيف المنظور ، ومن ثم إلى منطقة مئات الانجستروم ، فمصادر الضوء هى الذرات أو الجزيئات . وثمة وسائل مختلفة تجعلها تشع الضوء .

ومن أبسط المصادر الضوئية قطعة من مادة صلبة رفعت إلى درجة عالية من الحرارة . ويجوز أن تكون هذه القطعة كرة من الحديد مثلا ، سخنت إلى درجة الاحمرار أو إلى درجة الابيضاض . كما يمكن أن تكون فتيلاً من التنجستن كالمستعمل فى المصباح الكهربى ، المسخن بإمرار تيار كهربى فيه ، وقد لوحظ أن طيف المصادر التى من هذا الطراز يحتوى على كل الأطوال الموجية للضوء المنظور ، ويسمى بالطيف المستمر . وباستخدام لوح فوتوغرافى يتبين لنا أن جانباً كبيراً من الطاقة يقع فى المنطقة تحت الحمراء . وبرفع درجة حرارة الجسم الساخن تزاح قمة المنحنى المقابلة لأعلى طاقة يشعها الجسم من المنطقة تحت الحمراء إلى المنطقة المنظورة (وحينئذ تحكم العين بأن الجسم ساخن لدرجة الابيضاض) . وإزاحة قمة منحنى الطاقة نحو الأطوال الموجية القصيرة برفع درجة الحرارة ظاهرة

الطول الموجى (انظر بند ١٠ — ٩) . وبدلا من الرؤية البصرية ، يلجأ إخصائى الطيف عادة إلى استعمال لوح فوتوغرافى لتصويره . وفى هذه الحالة يسمى المطياف براسم الطيف أو الإسبكتروجراف . وباستعمال راسم طيف جيد يمكن قياس الأطوال الموجية إلى ستة أو سبعة أرقام معنوية . ونظراً لصغر الأطوال الموجية للضوء ، تستعمل عادة وحدة مشتقة من السنتيمتر تسمى الانجستروم ويرمز لها بالرمز أ° . وعلاقتها بالسنتيمتر هى :

$$١ \ أ° = ١٠^{-٨} \ سم$$

واللون هو الاستجابة الفسيولوجية للأطوال الموجية المختلفة فى الطيف المنظور . وينسب اختلاف الألوان إلى اختلاف الأطوال الموجية . وأكبر الأطوال الموجية التى نراها يناظر اللون الأحمر وأقصرها يناظر اللون البنفسجى . والعلاقة بين الطول الموجى واللون هى على وجه التقريب ما يأتى :

λ = ٠,٠٠٠٠٧٥ سم = ٧٥٠٠ أ° أحمر قانى
λ = ٠,٠٠٠٠٦٠ سم = ٦٠٠٠ أ° أصفر
λ = ٠,٠٠٠٠٥٢ سم = ٥٢٠٠ أ° أخضر
λ = ٠,٠٠٠٠٤٥ سم = ٤٥٠٠ أ° أزرق
λ = ٠,٠٠٠٠٤٠ سم = ٤٠٠٠ أ° بنفسجى

ولا تحس العين بالضوء الذى يزيد طول موجته عن نحو ٧٥٠٠ أ° ، أو ينقص عن ٤٠٠٠ أ° . وتسمى منطقة الأمواج الطويلة الواقعة بعد الجزء المنظور بمنطقة الأشعة تحت الحمراء أو منطقة الإشعاع الحرارى . أما الأطوال الموجية الأقصر من ٤٠٠٠ أ° ، فتقع فى المنطقة فوق البنفسجية ، ومتى بلغت فى القصر حداً كافياً اعتبرت أشعة سينية (أشعة أكس) . والطول الموجى لهذه الأشعة الأخيرة لا يزيد عن بضعة أنجستروم .

١٩ — ٥ مصادر الأمواج الكهرومغنطيسية :

إن مصدر أمواج الراديو هو التيار المتذبذب فى السلك الهوائى للمرسل ، وهو

ولكن فى الوقت الذى يقطع فيه الشعاع مسافة الذهاب والإياب يكون الوجه حـ قد انحرف عن الوضع الذى يسمح بانعكاس الأشعة منه إلى العينية . غير أنه إذا حدث الدوران بالسرعة الصحيحة تماماً (ومقدارها نحو ٣٢٠٠٠ دورة فى الدقيقة) يتخذ الوجه ء الوضع الصحيح بينما يكون الضوء قد ذهب وعاد بين المرآتين ، فيستطيع الراصد أن يرى صورة المصدر مرة أخرى . وبالقياس الدقيق لسرعة دوران المرآة م ، وللمسافة بين م ، م َ يمكن تعيين سرعة الضوء . وبعمل تصحيح للحقيقة المعروفة بأن سرعة الضوء فى الهواء أقل قليلا من سرعته فى الفراغ . وجد ميكلسون أن سرعة الضوء ٢٩٩,٧٩٦ كم/ثانيه فى الفراغ . وعلى ضوء هذه النتيجة بالإضافة إلى قياسات أخرى أحدث منها ، يمكن القول بأن القيمة المقبولة الآن لسرعة الضوء هى :

$$ع = (٢,٩٩٧٧٦ \pm ٠,٠٠٠٠٤) \times ١٠^{١٠} \text{ سم / ثانيه}$$

أى ما يعادل نحو ١٨٦٣٠٠ ميل/ثانيه فى الفراغ .

وفى العمليات الحسابية المعتادة يمكن اعتبار سرعة الضوء فى الهواء أو الفراغ مساوية إلى :

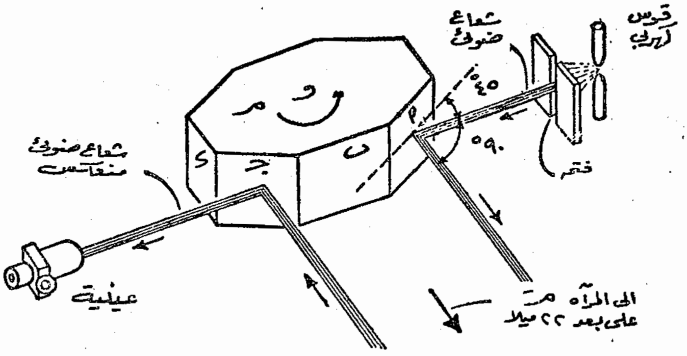
$$ث = ٣ \times ١٠^{١٠} \text{ سم فى الثانية}$$

ومن الجدير بالذكر أن النظرية النسبية تقضى بأن الكتل المتحركة لا تستطيع أبداً أن تتخطى هذه السرعة أو حتى تصل إليها ، وإن كانت تستطيع الاقتراب منها ، وقد أمكن مشاهدة إلكترونات بلغت سرعتها ٩٩,٩ ٪ من سرعة الضوء .

١٩ ــ ٤ الأطوال الموجية للضوء المنظور :

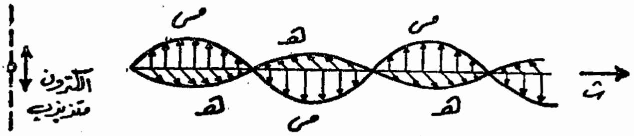
مما لا ريب فيه أن قياس الطول الموجى للضوء أسهل كثيراً من تعيين سرعته . وقد رأينا فى الفصل العاشر أن عمل محزوز الحيود ينحصر فى فصل المكونات الموجبة للضوء ، ويسمى الضوء عند ما تتفرق ألوانه بالطيف . ويسمى الجهاز الذى يشمل المحزوز مع مجموعة الأبصار والمقاييس بالمطياف المحزوزى . وبقياس المسافة بين خطين فى المحزوز بمعرفة زاوية حيود الضوء الذى له رتبة معينة ن ، يمكن حساب

البارزة هي تلك التي ابتكرها فوكو وفيزو (Foucault and Fizeau) عام ١٨٥٠، والتي عدلها ميكلسون (Michelson) فيما بعد لزيادة الدقة، حتى آلت في عام ١٩٢٦ إلى التجربة المبينة رمزيا في شكل ١٩ — ٢. فقد أقيمت في قمة جبل مونت ويلسون بكاليفورنيا محطة رصد تحتوي على مصدر ضوء ومرآة مثمنة قابلة للدوران وعينية للرصد وبعض أجهزة أخرى حذفت من الشكل للتبسيط. وعلى قمة جبل مونت سان أنطونيو الذي يبعد عن المحطة ٢٢ ميلا وضعت مرآة كبيرة مَ لتعكس الضوء فيرتد ثانية إلى المرآة المثمنة م. ولنفرض أن المرآة المثمنة كانت ثابتة في الوضع المبين في شكل ١٩ — ٢. فحينئذ، تقطع حزمة الضوء المنعكسة من الوجه ا مسافة ٢٢ ميلا لتصل إلى المرآة مَ ثم ترتد منها وتعود إلى المرآة م فتقابل الوجه ح الذي يعكسها بدوره إلى العينية، فيرى الراصد صورة لمصدر الضوء. ولنفرض الآن أن المرآة م قد دارت بزاوية صغيرة ثم ثبتت. في هذه الحالة ينعكس الشعاع



(شكل ١٩ — ٢)

الخارج منها بزاوية مختلفة فلا يتاح له أبداً أن يقابل المرآة مَ. وفي أي الحالات، إذا كان سطح المرآة مَ كبيراً جداً بحيث يستطيع أن يلتقط الشعاع الصادر من ا ويعكسه، فلن يتسنى للسطح ح أن يستقبله ويعكسه إلى العينية. ويظل الموقف لا يتغير بتغير زاوية دوران المرآة م حتى ينتقل الوجهان ب، ء إلى الوضعين اللذين كان يشغلهما الوجهان ا، ج. وعندئذ يصل الضوء مرة أخرى إلى العينية. فإذا جعلنا المرآة م تدور بسرعة كبيرة، فشعاع الضوء الصادر من ا نحو المرآة مَ سيرتد منها إلى م



(شكل ١٩ — ١)

عجلة الإلكترون المتحرك هى وحدها التى تشترك فى الإشعاع . وعليه ، يمكن تصوير الموجة الكهرومغنطيسية كمجموعة من المجالات الكهربية والمغنطيسية المتذبذبة ، المتعامد كل منها على الآخر وعلى اتجاه انتقال الموجة (شكل ١٩ —١) وقد نجح مكسويل فى إثبات أن الأمواج الكهرومغنطيسية المتحركة فى الفراغ لها السرعة نفسها ، أيا كان طول موجتها وكيفما كان مصدرها . والضوء المرئى ليس إلا أمواجاً كهرومغنطيسية ، وكذلك أشعة إكس . وقد تنبأت نظرية مكسويل بإمكان توليد أمواج كهرومغنطيسية طولها الموجى أكبر من طول موجة الضوء المنظور عدة ملايين من المرات ، وفى عام ١٨٨٧ استطاع هرتز (Hertz) أن يولد هذه الأمواج الطويلة بطريقة عملية ، ومن ثم عرفت آنئذ باسم الأمواج الهرتزية ، وهى ما نسميها الآن بأمواج الراديو . وأمواج الراديو تطابق أمواج الضوء ولا تختلف عنها إلا فى أن طول موجتها أكبر ، وقد يصل هذا الطول إلى عدة مئات من الأمتار ، فى حين أن طول موجة الضوء المنظور يبلغ نحواً من نصف جزء من مليون من المتر . وأشعة إكس هى كذلك أمواج كهرومغنطيسية لا تختلف عن الضوء إلا فى أن طولها الموجى أقصر .

١٩ — ٣ قياس سرعة الضوء :

لقد دعت المكانة البالغة الأهمية لسرعة الضوء فى الفيزياء إلى تعيينها بطرق متعددة ، بدأ عهدها من القرن السابع عشر وما زال مستمرًّا إلى يومنا هذا . ومعظم الطرق تعتمد على الوسيلة التى يتأتى بها قياس فترة زمنية قصيرة تبلغ نحواً من بضعة أجزاء من عشرة آلاف من الثانية . ولا ريب فى أن الطريقة الدالة على العبقرية

موضع الاعتبار هي أمواج الضوء ، فسوف تكتب :

$$ع = \gamma \lambda$$

وسرعة الضوء فى الهواء ، والأصح أن نقول فى الفراغ (والقيمتان لا تختلفان إلا اختلافاً طفيفاً) هى ثابت «كونى » عظيم الأهمية ، ويقصد بثابت كونى أن قيمته واحدة ، بغض النظر عن كيفية إجراء التجربة المستخدمة فى قياسه . (ولإيضاح ذلك نذكر أن عجلة الجاذبية حـ ليست ثابتاً كونيا إذ أن قيمتها تتوقف على مكان الراصد بالنسبة لمركز الأرض ،وعلى وجود كتل قريبة، وما إلى ذلك) . والواقع أن ثبات سرعة الضوء هو حجر الزاوية فى النظرية النسبية . وسوف تصادفنا الكمية عـ فى مواضع كثيرة غريبة ، مواضع لا يدخل فيها انتقال الضوء إطلاقاً بطريق مباشر .

لقد أشرنا فى مناقشاتنا السالفة إلى الضوء بوصفه أمواجاً كهرومغنطيسية . وقد قدم كلارك مكسويل هذا الرأى فى النصف الأخير من القرن التاسع عشر ، وما زالت هذه الصورة مقبولة فى الوقت الحاضر مع بعض التعديلات . ومع أن تفاصيل النظرية الكهرومغنطيسية أعلى كثيراً عن مستوى المناقشات الأولية التى نقدمها هنا فى الفيزياء ، إلا أننا نستطيع أن نرسم الخطوط العريضة للصورة التى تبرز من هذه النظرية . تقول هذه النظرية : إن انبعاث الضوء يرجع إلى الحركة العجلية للشحنة (التى نعرف الآن أنها الكترون) . وكل شحنة يحيط بها مجال كهربى ، يمثل بخطوط قوة تنبعث من الشحنة نحو الخارج . والشحنة المتحركة يحيط بها ، علاوة على المجال الكهربى ، مجال مغنطيسى يمثل بخطوط قوة مغنطيسية تكون دوائر متحدة المركز حول الشحنة المتحركة ، عمودية على خطوط القوة الكهربية وعلى مسار الحركة . فإذا كانت الشحنة متذبذبة . يكون بالمثل كل من المجال الكهربى والمجال المغنطيسى متذبذبين . وقد استطاع مكسويل أن يبرهن من نظرية هذه المجالات المتغيرة أن خطوط القوة الكهربية والمغنطيسية عند المسافات البعيدة من الشحنة تتغير تغيراً دوريا فى المكان والزمان . فهى إذن أمواج . ويقال فى هذه الحالة إن الشحنة تشع أمواجاً كهرومغنطيسية . وهى تستمر فى الإشعاع طالما بقيت متحركة بعجلة . ومركبة المجال الكهربى الموازية لاتجاه

الكم فى القرن الحالى لإمدادنا بمفهوم جديد أكثر شمولا وعمقاً وتغلغلا فى طبيعة العالم الفيزيائى .

ومما يدعو إلى العجب أن كلتا هاتين النظريتين الفذتين قد تبلورتا من ظاهرة فيزيائية واحدة هى أمواج الضوء . فقد قامت النظرية النسبية لتعليل مشكلة انتقال الضوء ، أما نظرية الكم فقد بزغت لتفسر مسألة انبعاث الضوء وامتصاصه . ولكى نفهم كيف دعت الحاجة إلى إعادة النظر فى النظرية الكلاسيكية للضوء ، ولكى نفهم أهمية الدور الذى لعبته النظرية النسبية ونظرية الكم فى هذا الموضوع ، يتعين علينا أن نستعرض الآراء التى كانت سائدة أثناء القرن التاسع عشر ونبين أوجه النقص فيها .

١٩ ــ ٢ النظرية الكهرومغنطيسية للضوء لمكسويل (Maxwell) :

دعنا نتجاهل مؤقتاً تفاصيل عملية انبعاث الضوء ونتأمل طبيعة أمواج الضوء نفسها .

لقد رأينا فى الفصل العاشر أن الضوء يعانى تداخلا إنشائيًّا وإتلافيا ، مما يؤيد طبيعته الموجية . كما أن قابلية الضوء للاستقطاب توحى بأن أمواجه مستعرضة . وقد سبق أن ذكرنا كذلك أن الموجة تتميز بثلاث كميات قابلة للقياس وهى : سرعتها (ع) ، وترددها (γ) ، وطول موجتها (λ) . وتكفى معرفة اثنتين من هذه الكميات لتحديد الثالثة ، إذ أنها ترتبط معهما بالتعبير البسيط .

$$ع = \gamma \lambda$$

ولا يوجد من بين الأمثلة العديدة للأمواج (أمواج الضوء وأمواج الصوت وأمواج الماء وأمواج الهزات الزلزالية . . . إلخ .) ما له أهمية كبيرة فى دراسة التركيب الذرى إلا أمــواج الضوء والأمواج المصــاحبة للجسيمات المتحركة . وبسبب الدور الأساسى الذى يؤديه الضوء فى الطبيعة فقد ألفنا أن نفرد لسرعته رمزاً منفصلا مميزاً هو ع . وعلى ذلك ، فمتى كانت الأمواج

الفصل التاسع عشر

الأمواج الضوئية والنظرية الكهرومغنطيسية للضوء

١٩ — ١ الضوء والفيزياء الحديثة :

كانت الفترة التاريخية التى اكتشف فيها الإلكترون والأشعة الموجبة فاتحة لعصر جديد هو عصر الفيزياء الذرية ، أو عصر الفيزياء الحديثة . فقد هيأ لنا هذان الاكتشافان بعض الدلائل الهامة التى أوحت إلينا بفكرة عن التركيب النهائى للمادة . وسوف نكرس الجانب الأعظم مما تبقى من هذا الكتاب للمضى فى التدرج بهذه النظرية الذرية . وهنا ينبغى أن نذكر بجلاء ، أن تجارب طومسون كانت ترتكز ارتكازاً راسخاً على الأسس الفيزيائية المعروفة آنئذ . فلم تدخل فى الموضوع قوانين أساسية جديدة ، كما لم يكن ثمة ما يستدعى الانحراف عن المبادئ المقبولة فى الديناميكا والالكتروديناميكا . وكل ما فى الأمر كان مجرد انتقال الاهتمام من فيزياء المجموعات أو التكتلات إلى فيزياء الجسيمات الأولية ، وبعبارة أخرى من الدراسات الماكروفيزيائية إلى الميكروفيزيائية . فقد كانت كتل الوحدات الذرية وما دونها ، كما كانت شحناتها والقوى المتبادلة بينها ، كل ذلك كان مما يدخل فى نطاق قوانين الفيزياء الكلاسيكية الراسخة الأركان .

ولو كان هذا المضمون العلمى للفيزياء الحديثة ، وأن كل ما تمخضت عنه هو مجرد الوصول بالظواهر الفيزيائية إلى مرحلة وضعها فى نماذج أساسية ، لما وجدنا فيها الكثير مما يستأثر الخيال ، ولما أدت بنا إلى شىء جديد فى أصوله . ولكن الأمر بخلاف ذلك . ولا جدال فى أن دراسة الجسيمات لها أهمية فائقة ، كما أن خواصها الميكانيكية والكهربية شىء لا غنى عنه ، ولكن الفيزياء العصرية قد أظهرت لنا أن بعض قوانين الفيزياء الأساسية السارية فى نطاق المقاييس الذرية ليست فى نفسها القوانين التقليدية متسربلة فى ثياب ميكروسكوبية . ولكنها شىء آخر يختلف عن ذلك تماماً . وعلى وجه التحديد ، نشأت النظرية النسبية ونظرية

مراجع مقترحة للاطلاع

Aston, F. W. "Mass Spectra and Isotopes", New York, Longmans, Green and Co., 1933.

فى الفصول الثالث والرابع والخامس عرض دقيق وسلس عن الأشعة الموجبة يقدمه حجة فى الموضوع .

Dampier, Sir William, "A History of Physics", New York, The Macmillan Co., 1946.

فى الصفحات ٣٨٩ — ٣٩١ قصة اكتشاف النظائر .

Magie, W. F. "Source Book in Physics", New York, Mc Graw-Hill Book Co., 1935.

فى الصفحات ٥٧٦ — ٥٧٨ استعراض لأبحاث جولدشتين عن الأشعة الموجبة وفى الصفحات ٥٩٧ — ٦٠٠ التجارب القديمة التى أجراها ڤين (Wien) عن انحراف الأشعة الموجبة .

تمارين

١ — وجد من قياسات أجريت على مجموعة من منحنيات الأشعة الموجبة (قطاعات مكافئة) أنه إذا اتخذت س (شكل ١٨ — ١) قيمة ثابتة معينه تأخذ ص لكل قطع مكافىء القيم التالية : ص$_١$= ٣,٥٠ مم ، ص$_٢$= ٤,٠٠ مم ، ص$_٣$= ٤,٧٥ مم . فإذا علم أن القطع المكافئ المناظر إلى ص$_٢$ ناشىء من أكسيجين ١٦ ، فأوجد كتل الأيونات التى أحدثت المنحنيين الآخرين (بفرض أن الأيونات أحادية التأين) . وشخص عناصرها .

الجواب : ١٤,٠ ، ١٩,٠

٢ — بمعلومية نسبة الكثرة النظرية للمغنيزيوم (انظر الجدول د) ، احسب الكتلة الذرية الكيموية للمغنزيوم .

الجواب : ٢٤,٣٦ و ك ذ

٣ — بمعرفة الكتل الدقيقة لنظائر الأكسجين ، ونسبة الكثرة النظرية (الجدول د) ، احسب الكتلة الذرية الفيزيائية للأكسيجين المعتاد .

الجواب : ١٦,٠٠٤٤٠ و ك ذ

٤ — اذكر أربع صور نظيرية محتملة لجزىء كلوريد الليثيوم (كل لى) .

٥ — احسب بالجرام الكتلة التقريبية لجزىء كل من نظائر اليورانيوم (انظر الجدول هـ)

الجواب : ٣,٨٨×١٠$^{-٢٢}$ ، ٣,٩٠×١٠$^{-٢٢}$ ، ٣,٩٥×١٠$^{-٢٢}$ جم

٦ — ذرة معينة كتلتها ٨,٤٦٦ × ١٠$^{-٢٣}$ جم . ما هو رقمها الكتلى ؟

الجواب : ٥١

تزج بنا فى مشكلات ميكانيكية تجعل تطبيق هذه الطريقة أمراً عسيراً .

٤ — أما الطريقة التى تنجح غاية النجاح فى فصل نظائر الهيدروجين نتيجة لكبر الفرق الكتلى (البالغ ١٠٠ ٪) . فتتضمن التحليل الكهربى للماء . فجزيئات الماء التى تحتوى على ذرتين من يد[١] يسهل فصلها كهربياً من الجزيئات القليلة التى تحتوى على ذرتين من يد[٢] . ويتبع ذلك أن السائل المتخلف فى الحوض الالكتروليتى يزداد ثراؤه ببطء فى الماء « الثقيل » . بهذه الكيفية أمكن رفع النسبة المعتادة لذرات النظير يد[٢] من ٠,٠٢ ٪ إلى ما يزيد عن ٩٩ ٪ .

بقى أن نقول كلمة تبصرنا بالسبب الذى من أجله تشتد الرغبة فى الحصول على النظائر المنفصلة . فهى تستعمل فى دراسة التفاعلات النووية . وخاصة الانفلاق النووى ، وسنبحث ذلك بالتفصيل فيما بعد . كما أن النظائر أصبحت أداة فعالة جداً فى كل فروع العلوم بوصفها من العوامل المفيدة فى اقتفاء آثار الذرات أينما حلت وحيثما ارتحلت . وعلى سبيل المثال ، إذا طعمت عينة من الكربون بالنظير ك[١٤] فسلوكها داخل الكائنات الحية وسلوك الكائنات الحية تجاهها لن يختلف عن سلوك الكربون المعتاد ك[١٢] ، إذ أن كلا النظيرين متطابقان كيموياً . ولكن كربون ١٤ يمكن دائماً اكتشافه بوساطة الوسائل الفيزيائية حيثما طاب له أن يستقر أو يتغلغل ، ولهذا يمكن مراقبة سيره فى وجود الكربون المعتاد . ويمكن اقتفاء معدل امتصاصه خلال الكائن الحى بعمل مقاطع فى مواضع مختلفة ، وتحليل الكربون بوساطة مطياف الكتلة لمعرفة ما إذا كانت نسبة أحد النظيرين قد زادت فيه ، وعينات النظائر المطعمة تسمى عادة بالذرات « ذات الأدلة » — ويمكن الكشف عن وجودها بغض النظر عن الذرات التى تسير فى ركابها (إذ أنها تسلك السبيل نفسه الذى تسلكه لو لم تكن مطعمة) . وسنرى فيما بعد أن هناك لوناً آخر من الذرات ذات الأدلة يسهل تداوله ، ونعنى به الذرات المشعة . ويؤدى هذان النوعان من الذرات مقتفيات الأثر دوراً بالغ الأهمية فى البحث العلمى .

(إذ يبلغ ١٠ ٪ فى النيون نو^{٢٠} ونو^{٢٢} و ٨ ٪ فى الكربون ك^{١٢} و ك^{١٣} ، وهكذا) . وطرق الفصل هذه تبلغ من التعقيد بحيث لا يتسنى لنا شرحها فى هذا المقام شرحاً مسهباً ، ولكننا سنكتفى بمجرد الإشارة إلى الأسس الجوهرية التى ينهض عليها تصميم أكثر هذه الطرق شيوعاً .

١ — تتوقف سرعة بعض التفاعلات الكيموية — إلى حد ما — على كتل الذرات والجزيئات المشتركة فى هذه التفاعلات . فالنظير الثقيل مثلا ، يتفاعل بسرعة تختلف اختلافاً طفيفاً عن سرعة النظير الخفيف . وقد نجحت هذه الطريقة بصفة خاصة فى رفع نسبة نظير النتروجين ن^{١٥} ونظير الكربون ك^{١٣} . فأصبحا الآن متاحين فى الأغراض التجارية .

٢ — إذا وجد نظيران فى درجة حرارة واحدة ، تكون لهما طاقة الحركة نفسها . ونظراً لاختلاف الكتلة ، تكون السرعة الحرارية للنظيرين مختلفة اختلافاً طفيفاً . ويتبع ذلك أنه فى الحالة الغازية يستطيع النظير الأخف وزناً والأكبر سرعة أن ينتشر خلال الأجسام المسامية ، كالأوانى الخزفية غير المطلية ، ويكون انتشاره بمعدل أسرع من معدل انتشار النظير البطىء . فإذا ما أزيح النظير الخفيف بعيداً بمجرد تسربه حتى نمنع عنه فرصة العودة ، ينشأ عن ذلك انفصال جزئى . وفى أحد التعديلات التى أدخلت على هذه الطريقة يستبدل بالجسم المسامى مزيد من نوع الغاز نفسه (تسمى العملية فى هذه الحالة « بالانتشار الذاتى ») . وقد استخدمت أيضاً الفروق فى درجة الحرارة لإحداث الانفصال . وقد ثبت أن طرق الانتشار هذه لها حظ معقول من النجاح فى حالة العناصر الخفيفة .

٣ — إذا ملىء جهاز دوار (آلة التركيز الطاردة) بغاز يحتوى على خليط من النظائر ، فالحركة الدورانية (القوة المركزية الطاردة) تدفع بالذرات الثقيلة بعيداً عن مركز الدوران أكثر مما تدفع بالذرات الخفيفة . نرى من ذلك أن الجهاز العالى السرعة يمكن استخدامه كما يستخدم فى عملية فصل القشدة من الحليب . والقشدة هنا هى النظير الخفيف ، أما الحليب فهو النظير الثقيل . والسرعات العالية اللازمة لإحداث انفصال محسوس (وتبلغ نحواً من ١٠٠٠ دورة فى الثانية)

هذه العملية فى حالات قليلة : فأمكن تجريد الكربون ${}_{٦}$ك^{١٢} من إلكتروناته الستة وتحويله إلى إيون سداسى التأين ك${}^{++++++}$ (يكتب الآن عادة بالصورة ك${}^{٦+}$) وكل هذه الدلائل توحى بأن الذرة لا تمتلك إلا عدداً محدوداً من الالكترونات . ولما كانت الذرات المعتادة متعادلة كهربيًّا ، يتحتم أن تكون على النواة شحنة موجبة مساوية لهذا العدد .

ويمكننا أن نلجأ إلى فكرة الرقم الذرى (الشحنة النووية) لنعود من جديد إلى تعريف النظائر : النظائر ذرات لها الرقم الذرى نفسه ولكنها تختلف فى الكتل الذرية . فمثلا ، فى كل من نظيرى النيون ${}_{١٠}$نو^{٢٠} ، ${}_{١٠}$نو^{٢٢} ، تمتلك النواة ١٠ شحنات موجبة ، ولكن كتلة أحد النظيرين تزيد عن كتلة الآخر بمقدار وحدتين . وكما نوهنا من قبل ، توجد عناصر طبيعية قليلة ليس لها إلا نظير واحد . بمعنى أن كل ذرات العنصر فيها لها الكتلة نفسها . ونضرب مثلا بذرات الفلورين ${}_{٩}$فل^{١٩} فكتلة كل منها ١٩ وحدة .

١٨ — ٨ فصل النظائر :

نظراً لكون النظائر فى أى عنصر متطابقة من الناحية الكيموية ، فلا توجد وسيلة كيموية بسيطة لعزل نظائر العنصر . وليس من شك فى أن الجهاز الذى توصلنا به إلى اكتشافها ، ألا وهو مطياف الكتلة ، يؤدى عملية الفصل على وجه مرض جدًّا . ولكن المشكلة تنحصر فى ضآلة الكميات المفصولة ، فبعد عدة ساعات من العمل لا يمكن الحصول من مطياف الكتلة المعتاد الشائع فى المعامل إلا على بضعة أجزاء من مليون من الجرام من النظير المفصول . وفى خلال الحرب العالمية الثانية بنيت مطاييف عملاقة ، الغرض منها زيادة ذلك الإنتاج ، برغم صعوبة هذه العملية وكثرة تكاليفها . وبالإضافة إلى مطاييف الكتلة جربت وسائل أخرى كثيرة ، يهدف أغلبها إلى تحقيق فصل جزئى ، أو بعبارة أخرى ، زيادة تركيز نظير معين فى العنصر ، وتعتمد كافة الطرق بدون استثناء على الفرق فى الكتلة ، وفيما عدا الهيدروجين حيث يصل الفرق إلى ١٠٠ ٪ ، فالفرق فى الكتلة صغير

النواة ، بمعنى أن عناصر الجدول ترتب ترتيباً تصاعدياً بالنسبة لشحنة النواة . فموقع العنصر ، وبالتالى الشحنة النووية لذرته ، هو الرقم الذرى . فالهيدروجين هو العنصر رقم ١ والنيون رقم ١٠ وهكذا ، حتى نصل إلى اليورانيوم رقم ٩٢ . وبما أن الذرة تتحدد تماماً بمعرفة خاصتين هامتين فيها، هما الرقم الذرى والكتلة النظيرية ، فمن المفيد أن نستعمل اصطلاحاً يدل عليهما معاً . وقد جرت العادة بأن يوضع الرقم الكتلى فى الزاوية اليسرى العليا للرمز الكيموى للعنصر ، ويكتب الرقم الذرى فى الزاوية اليمنى السفلى . وبذلك تكتب الرموز المميزة للنظائر على النحو التالى :

هيدروجين ${}_{١}$يد^{١} ، ${}_{١}$يد^{٢}

نيتروجين ${}_{٧}$ن^{١٤} ، ${}_{٧}$ن^{١٥}

أكسيجين ${}_{٨}$أ^{١٦} ، ${}_{٨}$أ^{١٧} ، ${}_{٨}$أ^{١٨}

يورانيوم ${}_{٩٢}$يو^{٢٣٤} ، ${}_{٩٢}$يو^{٢٣٥} ، ${}_{٩٢}$يو^{٢٣٨}

وقد تواردت ، فى تمهل وبطء ، الدلائل المشيرة إلى التركيب النووى للذرة ، بوصفها شحنة مركزية موجبة محوطة بإلكترونات سالبة ، ولكنها كانت دلائل حاسمة ، وقد جاءت من عدة مصادر . وكانت الدعامة الأساسية فى هذه الدلائل نجاح نموذج بوهر للذرة (انظر الفصل الثالث والعشرين) ، وهو النموذج الذى كان التركيب النووى فيه فرضاً أساسياً . ولم يكن هذا كل ما فى جعبة أنصار النموذج النووى ، فقد كانت هناك مشاهدات أخرى تزكيه وتعززه . فلم يثبت أبداً من تجارب مطياف الكتلة إمكان وجود أيون لذرة الهيدروجين ينقصه الكترونان (أى ثنائى التأين) ، مما يقطع بأن الهيدروجين لا يمتلك من الإلكترونات إلا الكتروناً واحداً يمكنه أن يفقده . وبالمثل ، شوهد أن الهليوم يمكن أن يوجد فى حالة تأين أحادى أو تأين ثنائى ، ولكنه لم يوجد أبداً فى حالة تأين ثلاثى ، وقد وجد أن أقصى شحنة تحملها أيونات الليثيوم هى ٣ . ومن العسير جداً أن « نسلخ » من الذرات الأخرى أكثر من إلكترونين أو ثلاثة ، ومع ذلك فقد أمكن إتمام

ولا يوجد فى الطبيعة عنصر كتلته الذرية الوحدة . وأقرب شىء لذلك العنصر هو نظير الهيدروجين ١ . فكتلته الذرية منسوبة إلى أكسيجين ١٦ (فى مطياف الكتلة) بحسبانه ١٦ وحدة هى ١,٠٠٨١٣٠ . وعلى ذلك ، فكتلة ذرته هى :

$$١,٦٦ \times ١٠^{-٢٤} \times ١,٠٠٨ = ١,٦٧٣ \times ١٠^{-٢٤} \text{ جم}$$

ومن الطريف أن نقارن هذا بأصغر كتلة معروفة فى الطبيعة ، ألا وهى كتلة الإلكترون . إن أدق تقدير لكتلة الإلكترون هو :

$$\text{كتلة الإلكترون} = ٩,١٠٦٦ \times ١٠^{-٢٨} \text{ جم}$$

ولو حسبنا النسبة بين كتلة ذرة الهيدروجين وكتلة الإلكترون لوجدناها :

$$\frac{١,٦٧٣ \times ١٠^{-٢٤}}{٩,١٠٧ \times ١٠^{-٢٨}} = ١٨٣٧$$

ومعنى ذلك أن أخف العناصر ، وهو هيدروجين ١ ، أثقل ١٨٣٧ مرة من الالكترون . ولما كان مطياف الكتلة لا يقيس إلا كتل الأيونات ، فلا بد من عمل تصحيح صغير لكتلة الالكترون الناقص عند تعين الكتل الذرية . والكتل النظيرية تذكر عادة للذرات المتعادلة .

١٨ ــ ٧ الجدول الدورى للعناصر :

لقد لفت كثير من الكيمويين النظر إلى أهمية ترتيب العناصر وفق نظام خاص . وكان من السابقين إلى ذلك « ماير » و « نيولاندز » و « مندليف » وآخرون غيرهم فى العقد التالى لعام ١٨٦٠ . وجملة العناصر التى وجدت على الأرض تبلغ ٩٢ عدا . ومع أن الفيزيائى قد تمكن حديثاً من إنتاج بعض العناصر الأخرى (نذكر منها مثلاً عنصر البلوتونيوم) فالعناصر الطبيعية تكون قاعدة عالمنا كما نعرفه . والترتيب الشائع للعناصر هو الجدول الدورى ، وقد عرضناه فى إحدى صوره فى نهاية هذا الكتاب . والعناصر التى تقع فى كل عمود من الجدول تتميز بالتشابه الكيموى . وفى الجداول القديمة كانت العناصر ترتب ترتيباً تصاعدياً بالنسبة للوزن الذرى . أما الحكم فى الترتيب فى الوقت الحاضر فيتوقف على شحنة

نفسه خليطاً من النظائر . فهو يحتوى على ٩٩,٧٦ ٪ أكسجين ١٦ و٠,٠٤ ٪ أكسيجين ١٧ و٠,٢٠٪ أكسيجين ١٨ . وهذا الخليط هو الذى اصطلح على اعتبار كتلته الكيموية ١٦,٠٠٠ . وجلى أن هذا الخليط لا يصلح كمعيار للكتل النظيرية . ومن أجل ذلك ، فكل الكتل النظيرية تنسب إلى نظير الأكسيجين ١٦ ، وتكون وحدة الكتل الذرية على هذا الأساس هى $\frac{١}{١٦}$ من كتلة أكسيجين ١٦ . وعليه ، فالتنبؤ بمتوسط الكتل الذرية (أى الكتلة الذرية الكيموية) بمعلومية الكتل النظيرية لن يتفق تماماً مع التقدير الكيموى لمتوسط الكتل . على أن هذا الاختلاف الطفيف لا يهم إلا فى التقديرات البالغة الدقة ، إذ أنه يبلغ جزءاً من ٤٠٠٠ . وفى دراسة الخواص الفيزيائية للذرات ،وهو ما يعنينا فى هذا الكتاب ، ستكون كل الكتل الذرية منسوبة بطبيعة الحال إلى المقياس النظيرى، بمعنى أن وحدة الكتل الذرية ستكون $\frac{١}{١٦}$ منكتلة نظير الأكسيجين١٦

١٨ ــ ٦ كتلة وحدة الذرات :

بقسمة الكتلة الذرية لأى عنصر على عدد « أفوجادرو » يمكننا أن نحسب بالجرام الكتلة الفعلية للذرة الواحدة . ووفقاً لأدق التقديرات لعدد أفوجادور ، تكون كتلة الذرة الواحدة من عنصر افتراضى كتلته الذرية الوحدة هى(١,٦٦٠٣٥± ٠,٠٠٠٣١) × ١٠$^{-٢٤}$ جم . وتسمى هذه الكمية « بوحدة الذرة » أو « وحدة الكتل الذرية » . ويرمز لها بالرمز و ك ذ . وسنكتب قيمتها على وجه التقريب ، مكتفين بثلاثة أرقام معنوية ، كما يلى :

$$١ \text{ و ك ذ} = ١,٦٦ \times ١٠^{-٢٤} \text{ جم}$$

والكتلة الذرية لهذه الذرة هى الوحدة ، بحسب التعريف . وعليه ، فلو رمزنا بالرمز ا للكتلة النظيرية لأى عنصر ، فالكتلة الفعلية للذرة الواحدة مقدرة بالجرام هى :

$$\text{كتلة الذرة من النظير الذى رقمه الكتلى ا} = \text{ا} \times ١,٦٦ \times ١٠^{-٢٤} \text{ جم}$$

فمثلا ، كتلة الذرة من نظير الكلورين ٣٥ هى :

$$١,٦٦ \times ١٠^{-٢٤} \times ٣٥ \text{ جم} = ٥٨,١ \times ١٠^{-٢٤} \text{جم}$$

١٨ ــ ٥ الكتلة الذرية الفيزيائية مقابل الكتلة الذرية الكيموية :

بالتعيين الدقيق لكتل المواد التى تتحد لتكون جزيئات ، استطاع الكيموى الحصول على الكتل الذرية النسبية لجميع العناصر . وقد وجد أنه لو خصصنا للأكسيجين الطبيعى ١٦ وحدة كتلية ، لأمكن التعبير عن الكتل الذرية لأغلب العناصر الخفيفة بأرقام صحيحة تقريباً . وعلى هذا الاعتبار تكون الكتلة الذرية للهيدروجين ١,٠٠٨ وللهليوم ٤,٠٠٢ وللكربون ١٢,٠١ وللنيتروجين ١٤,٠٠٨ وللفلورين ١٩,٠٠٠ ، وهكذا . واعتماداً على هذا فرض براوت (Prout) عام ١٨١٣ أن ذرات سائر العناصر تبنى من ذرات الهيدروجين . وسنرى فيما بعد أن هذه الخبطة العشوائية تحمل بين طياتها أمارات الحقيقة . غير أن فرض براوت لم يهيىء لنا سبيلا لتعليل وجود الكسور فى الكتل الذرية ، فمثلا الكتلة الذرية للكلورين ٣٥,٥ وللنحاس ٦٣,٦ ، وهكذا فى عناصر أخرى كثيرة .

وقد أدى اكتشاف وجود النظائر إلى وجوب تمحيص مدلول الكتل الذرية تمحيصاً دقيقاً . فالكيموى ، الذى يتعامل بطبيعة الحال بأعداد كبيرة من ذرات العناصر ، لا يسعه إلا الحصول على متوسط الكتلة الذرية بالنسبة إلى الأكسيجين الطبيعى باعتباره ١٦ وحدة . ويسمى هذا التقدير المتوسط بالكتلة الذرية الكيميوية. وبعكس ذلك ، الفيزيائى الذى يجرى قياساته بمطياف الكتلة بفصل المكونات النظيرية ، وبرصد الانحناء فى المجالات الكهربية والمغنطيسية يمكنه الحصول على كتلة كل من هذه المكونات . وتسمى هذه الكتلة بالكتلة النظيرية ، وبمعرفة الكتلة النظيرية يمكننا أن نتنبأ بالكتلة الكيموية . فمثلا للكلورين (الكلور) نظيران هما كلورين ٣٥ (الأصوب ٣٤,٩٧٩) بنسبة ٧٥,٤٪ وكلورين ٣٧ (الأصوب ٣٦,٩٧٨) بنسبة ٢٤,٦٪ . وحينئذ .

الكتلة الكيموية = ٣٥ × ٠,٧٥ + ٣٧ × ٠,٢٥ = ٣٥,٥

وقد نشأت تفرقة أخرى بين الكتل الكيموية والكتل النظيرية عام ١٩٢٩ حينما اكتشف « جيوك » و «جونستون» أن المرجع العيارى ، وهو الأكسيجين ، كان هو

متداخلة . وبهذه الكيفية يمكن فصل الأيونات المتساوية السرعة . ويمكننا أن نكون فكرة عن الدقة الفائقة فى مطياف الكتلة الحديث من عدد الأرقام المعنوية فى العدد الكتلى ٢٢,٠٠٨٦ وهى التقدير الصحيح لكتلة نظير النيون ٢٢ . وسوف تتضح أهمية هذه التقديرات الصحيحة للكتل الذرية عند ما نجىء إلى دراسة التفاعلات النووية . ومن المألوف الإشارة إلى الكتلةالايسوتوبية بأقربعدد صحيح إليها (أقصى اختلاف عن العدد الصحيح وجد حتى الآن لا يزيد عن ٠,٠٨ ٪) . وعلى هذا الاعتبار نسمى النظير الثانى للنيون نيون ٢٢ ، لا نيون ٢٢,٠٠٨٦ ، وهلم جراً فى سائر النظائر .

وبالإضافة إلى تزويدنا بالقيم الكتلية الدقيقة ، فمطياف الكتلة يكشف لنا الستار عن الكثرة النسبية للنظائر فى الطبيعة ، وذلك بقياس الشدة النسبية للآثار التى تتركها على اللوح الفوتوغرافى الكاشف ، الذى ينتهى إليه مسارها . وقد عرفنا الكثير عن المعالم الهامة للتركيب الاستوبى للعناصر . فالهيدروجين وهو أخف العناصر كلها ، له نظيران موجودان فيه بنسبة ٩٩,٩٨٪ هيدروجين ١ و ٠,٠٢ ٪ هيدروجين ٢ . وهذا الأخير إذا اتحد مع الأكسيجين يعطى ما يعرف « بالماء الثقيل » . وإذا اطلعنا على جدول النظائر فسوف يدهشنا أن نجد أن الفلورين (الفلور) والصوديوم والألمنيوم والفسفور والأيودين (اليود) وعدة عناصر أخرى غيرها ليس لها إلا نظير واحد . أما باقى العناصر فلها نظيران أو أكثر . ويحتوى القصدير على أكبر عدد من النظائر ، إذ يبلغ عشرة . (العناصر التى تلى الرصاص تضمها مجموعة خاصة سوف يعنينا أمرها فيما بعد. وعلينا أن نعفيها الآن من هذا النقاش) . فالعينة المعتادة من القصدير تحتوى على ذرات كتلها الذرية تمتد من ١١٢ إلى ١٢٤ فيما عدا ١١٣ و ١٢٣ فهما مفقودان . والكتلة الذرية الكيموية المعتادة ، وهى ١١٨,٧ ، ليست إلا المتوسط الحسابى للقيم السابقة مع وضع اعتبار للكثرة النسبية لكل نظير . وفوق ذلك ، فكل عينة من القصدير تم تحليلها حتى الآن ظهرت فيها الكثرة النسبية للنظائر نفسها . والواقع أن البيانات التى يمدنا بها مطياف الكتلة تدل على أن الكثرة النسبية لنظائر العناصر كافة (تقريباً) الموجودة فى الطبيعة ثابتة لا تتغير . ولم تعرف بعد معرفة كاملة علة وجود النظائر بهذه النسب .

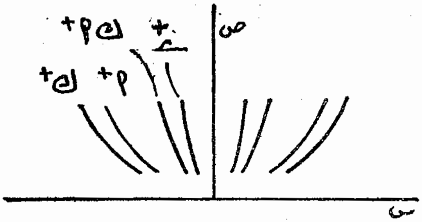
ك+ ، ا+٢ ، ا+) ، كما لم يكن من المستساغ أن يعزى منحنى الكتلة ٢٢ إلى نيون كتلته ٢٠ ولكن له شحنة أصغر قليلا من شحنة الإلكترون ، فقد ثبت بالدليل القاطع من تجربة قطرة الزيت (ومن تجارب أخرى سواها) ، أن الشحنات لا توجد إلا كمضاعفات صحيحة لشحنة الإلكترون ، ولا توجد شحنة تساوى مثلا ٠,٩ من شحنة الإلكترون أو تساوى أى كسر آخر منها . وهكذا بعد استقصاء كافة الاحتمالات ودرسها بكل عناية ونبذ ما لا يستقيم منها مع الحقائق المعروفة . لم يبق أمام « طومسون » إلا الجزم بأن منحنى الكتلة ٢٢ لابد أن يكون هو أيضاً منحنى نيون . كانت الظواهر توحى بأن ذرات النيون ، برغم أنها كلها متطابقة من الناحية الكيميائية ، إلا أنها ليست متساوية فى الكتلة . فمن بين كل عشر ذرات توجد ذرة أثقل من التسع الأخريات بنحو ١٠ ٪ (النسبة ١ : ١٠ هى نسبة شدة الوضوح فى المنحنيين) . وتسمى ذرات العنصر الواحد التى لها أوزان مختلفة بالنظائر أو الإيسوتوبات . ولفظة إيسوتوب مشتقة من كلمتين يونانيتين بمعنى « نفس المكان » ، أى الذرات التى تشغل المكان نفسه فى الجدول الدورى للعناصر . لقد نجح « طومسون » فى إثبات أن النيون له نظيران ، وهما نيون ٢٠ ونيون ٢٢ . (الأصوب أن للنيون ثلاثة نظائر — أما النظير الثالث فهو نيون ٢١ الذى اكتشف أخيراً . وقد كان من الصعب مشاهدته بسبب ندرة وجوده) .

١٨ — ٤ مطياف الكتلة أو إسبكتروجراف الكتلة :

لما كان الجهاز الذى استعمله طومسون لتبيان وجود النظائر يباشر فصل الكتل المختلفة للأيونات ، فهو خليق بأن يسمى مطياف الكتلة ، وهذا جهاز يفرق بين الكتل الذرية المختلفة ، مكوناً « طيفاً » كتليا ، على غرار الطيف الذى يكونه محزوز الحيود . وقد تطور مطياف الكتلة على أيدى استون (Aston) ، ودمبستر (Dempster) وبينبردج (Bainbridge) وكثيرين غيرهم ، إلى آلة عالية الدقة . وفى مطياف الكتلة الحديث تكون المجالات عادة متعامدة ، ولكنها مرتبة على التسلسل وليست

١٨ – ٣ اكتشاف النظائر :

استعمل « طومسون » فى إحدى تجاربه ، غاز النيون النقى فى أنبوبة التفريغ . ولكن النيون المستعمل ، كسائر الغازات التى نسمها نقية ، كانت به آثار ضئيلة من غازات أخرى – ونعنى الأكسيجين فى الحالة التى نحن بصددها . ولهذا توقع طومسون أن يجد منحنى س/ك للنيون الأحادى التأين مع احتمال وجود منحنى باهت



(شكل ١٨ – ٣)

للأكسيجين الأحادى التأين ، وربما أيضاً النيون الثنائى التأين وجزىء الأكسيجين الأحادى التأين . وقد وجد فعلا هذه المنحنيات ، ولكنه للعجب الشديد وجد معها بالإضافة إلى ذلك منحنيا باهتاً لم يكن يتوقع مشاهدته . وكان ذلك المنحنى الغريب يقع ملاصقاً لمنحنى النيون . وبقياس مواقع منحنى النيون الرئيسى والمنحنى المجاور له بالنسبة لموقع منحنى الأكسيجين استطاع « طومسون » أن يحدد كتل الأيونات المسئولة عن هذه المنحنيات . وباتباع ما درج عليه الكيميائيون من اعتبار كتلة ذرة الأكسيجين مساوية ١٦ وحدة اختيارية ، وجد أن منحنيى النيون يمثلان كتلا مقدارها ٢٢ وحدة (للمنحنى الخافت) و ٢٠ وحدة (للمنحنى الواضح) . ومن الجدير بالملاحظة أن الكتلة الذرية التى سبق أن وجدها الكيميائيون للنيون هى ٢٠,٢ وحدة على أساس أن كتلة ذرة الأكسيجين ١٦ وحدة ، ولذا فقد كان من المعقول الافتراض بأن المنحنى المناظر للكتلة ٢٠ مرده إلى غاز النيون وكان لابد من استبعاد الاحتمال بأن المنحنى الخافت المناظر للكتلة ٢٢ ناشئ من شائبة من الشوائب ، بحسبان هذا الاحتمال غير جائز ، إذ أنه لا يوجد عنصر آخر كتلته الذرية قريبة من ٢٢ ، ثم إن أى جزىء كتلته الجزيئية ٢٢ وحدة تظهر له حتماً منحنيات تنتج من مكوناته الذرية .(فمثلا ، عند ما وضع فى أنبوبة التفريغ غاز ثانى أكسيد الكربون ك ا$_{٢}$ ، شوهدت منحنيات لكل من ك ا$_{٢}^{+}$ ،

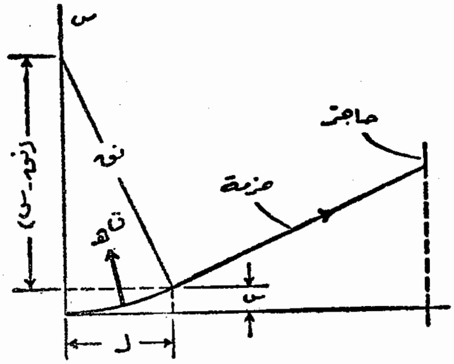
$$\therefore \quad س = \frac{ل^2}{2ق} = \frac{هـ س ل^2}{2 ك ع}$$

$$\text{ومنها} \quad س^2 = \frac{هـ^2 س^2 ل^4}{4 ك^2 ع^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١٨ - ٢)$$

وبقسمة المعادلة (١٨ — ٢) على المعادلة (١٨ — ١) ، وحل الناتج لإيجاد س^2 ، نحصل على

$$س^2 = \left(\frac{هـ^2 س ل^2}{2 ك م}\right) ص .$$

وبما أن كل الرموز داخل القوسين ثابتة . فالمعادلة تمثل قطعاً مخروطاً مكافئاً يعطينا الانحرافات س ، ص للحزمة لدى خروجها من المجالين ، هـ . وكل الكميات فيما عدا س/ك ثابتة للجهاز يمكن قياسها . وعليه ، فبتعيين س، ص استطاع «طومسون» أن يحسب س/ك لأنواع مختلفة من الأيونات . ويبين شكل ١٨ — ٣ مجموعة نموذجية من القطاعات المكافئة .



(شكل ١٨ — ٢)

وفى كل من المساقط المبينة فى شكل ١٨ — ٣ ، تكون للأيونات التى تصطدم بنقط المنحنى المختلفة الشحنة النوعية س/ك نفسها ، ولكنها لا تختلف إلا فى السرعة ، فالأيونات السريعة ترتطم قرب المركز (مركز الحاجز ، وهو مركز الاحداثيات نفسه) أما الأيونات البطيئة فترتطم بعيداً عنه على امتداد القطع المكافىء . وللحصول على فرعى القطع المكافىء يعكس اتجاه المجال المغنطيسى هـ أثناء التجربة . وبإدخال غازات مختلفة فى أنبوبة التفريغ ، يمكن قياس النسبة س/ك للأيونات المختلفة .

١٨ ــ ٢ نظرية منحنى الأشعة الموجبة :

تصور أيوناً موجباً واحداً كتلته ك ، وشحنته سـ ، وسرعته ع ، يتحرك عمودياً على مجال كهربى مواز لمجال مغنطيسى ، وافرض أن المجالين منتظمان خلال المسار الذى طوله ل . القوة الكهربية هى :

$$ق_م = سـ م$$

وتعمل فى الاتجاه الموجب لمحور الاحداثيات الصادى (شكل ١٨ ــ ١) . ويترتب على وجود هذه القوة عجلة منتظمة فى ذلك الاتجاه ، وهى

$$ح = \frac{ق_م}{ك} = \frac{سـ م}{ك}$$

والوضع هنا يماثل حركة الهبوط فى قذيفة أطلقت فى الاتجاه الأفقى ، مع استبدال مجال الأرض الجاذبى فى حالة القذيفة بمجال كهربى منتظم فى حالة الأيون (راجع بند٥ــ٨) .ينتج من ذلك أن الأيون يرتفع بعد زمن ن مسافة ص إلى أعلى حيث

$$ص = \frac{١}{٢} ح ن^٢ = \frac{١}{٢} \frac{سـ م}{ك} ن^٢$$

$$= \frac{١}{٢} \frac{سـ م}{ك} \frac{ل^٢}{ع^٢} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (١٨ــ١)$$

إذ أن الزمن $ن = \frac{ل}{ع}$

والقوة المغنطيسية هى سـ ع هـ ، وتعمل فى اتجاه عمودى على مسار الإلكترون ،

وإذن $ق_هـ = سـ ع هـ = \frac{ك ع^٢}{نق}$

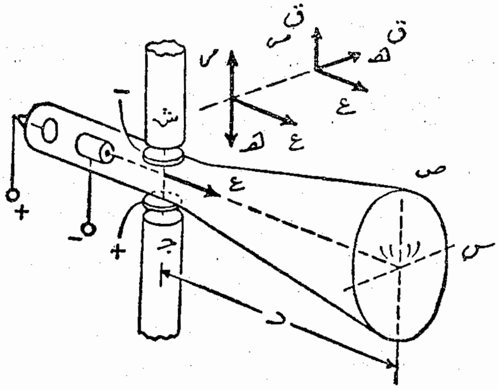
ومن شكل ١٨ ــ ٢ نجد أن

$$نق^٢ = (نق ــ س)^٢ + ل^٢$$

أى أن $نق = \frac{ل^٢}{٢ س}$ تقريباً

من نقطة تقع مثلا فى منتصف طول الأنبوبة . ومن أجل هذا لا يتأتى لنا استعمال طريقة المجالين المتعامدين م ، هـ ، إذ أننا بذلك لن نستطيع أن نحقق أحد المطلبين اللازمين لنجاح التجربة ، ونعنى بذلك معادلة الانحراف .

وقد استطاع طومسون أن يجد حلا لهذه المعضلة باستعمال مجال مغنطيسى مواز للمجال الكهربى وقد أصبحت طريقة المجالين المتوازيين معروفة باسم «طريقة القطع المكافئ » ، إذ أنها تؤدى بالأشعة الموجبة إلى رسم قطع مكافئ على الحاجز إذا كانت نسبة الشحنة إلى الكتلة واحدة فى جميع الأيونات مهما اختلفت سرعتها . ويبين شكل ١٨ ــ ١ ترتيب المجالين فى الفضاء . وفى حين أن المجال المغنطيسى يحدث



(شكل ١٨ ــ ١)

فى الأيونات الموجبة حركة إلى اليمين (فى الاتجاه الموجب للمحور السينى) ، فإن المجال الكهربى يحدث فيها فى الوقت نفسه حركة رأسية إلى أعلى (فى الاتجاه الموجب للمحور الصادى) . ويعانى الأيون البطىء انحرافاً كبيراً فى الاتجاهين السينى والصادى ، أما الأيون السريع فيعانى انحرافاً أقل . ويمكننا أن نثبت ــ كما سيتضح بعد ــ أن كافة الأيونات التى لها نفس نسبة الشحنة إلى الكتلة ، بغض النظر عن سرعاتها ، تقع كلها على منحن واحد ، والشكل الرياضى لهذا المنحنى هو قطع مخروطى مكافئ ، ومن هنا اتخذت هذه الطريقة اسمها المشهور . وكل قطع مكافئ يمثل المحل الهندسى لأيونات لها نسبة الشحنة نفسها إلى الكتلة .

الفصل الثامن عشر

اكتشاف النظائر

١٨ – ١ تجربة الأشعة الموجبة – أبحاث ج . ج . طومسون :

تحتوى أنبوبة التفريغ الغازية على أيونات موجبة وعلى إلكترونات . وقد سبق أن رأينا أن حزمة الإلكترونات (أشعة الكاثود) يمكن أن تدرس دراسة مثمرة . وقد ظهر أن التجارب على حزم الأشعة الموجبة هى كذلك منتجة ومجزية . فقد أدت هذه التجارب على يدى « طومسون » عام ١٩٠٧ ، إلى إزاحة النقاب عن حقيقة هامة بشأن كتل الذرات – تلك الحقيقة هى : أن ذرات أى عنصر كيميائى معين قد تكون لها عدة كتل مختلفة .

منذ عام ١٨٨٦ لاحظ (جولدشتين Goldstein) حزمة متوهجة من الأيونات الموجبة تنطلق من ثقب فى كاثود أنبوبة التفريغ . وقد سميت هذه الحزمة بالأشعة الموجبة ، وقد استعمل ترتيب مماثل لذلك للحصول على هذه الأشعة فى التجارب التى جاءت فى أعقاب تجارب جولدشتين . وقد صمم « طومسون » تجربة تهدف إلى دراسة خواص هذه الأشعة ، ولا سيما نسبة الشحنة إلى الكتلة فيها . وقد يبدو لأول وهلة ، أن كل ما نحتاج إليه لتحقيق ذلك هو مجرد تكرار نسبة الشحنة إلى الكتلة فى أشعة الكاثود ، ولكن على الجانب المضاد من الأنبوبة فى هذه المرة . إلا أن الواقع يختلف عن ذلك كثيراً . وأولى المشكلات التى تواجهنا هى تعذر استعمال المجالين المتعامدين مـ ، هـ كما استعملناهما فى تجربة س /ك لأشعة الكاثود فمن المحال هنا ضبط مـ ، هـ بحيث ينعدم الانحراف لكل جسيمات الأشعة الموجبة . ولما كان نجاحنا فى موازنة الانحراف فى تجربة س /ك لأشعة الكاثود يعتبر دليلا ناصعاً على تساوى السرعة فى كل جسيمات أشعة الكاثود ، لهذا فإنا نستنتج عن يقين بأن جسيمات الأشعة الموجبة لا تمتلك كلها السرعة نفسها . وليس هذا بمستغرب ، إذ أن الأيونات تتكون فى الغاز ، وطبيعى أن الأيون الذى يبدأ قرب الأنود يكتسب لدى وصوله إلى الكاثود سرعة أكبر من سرعة الأيون الذى يبدأ

٦ — احسب بالإرج الطاقة فى ٣٥ أ ف ، ١٥٠ ك أ ف ، ٥ م أ ف.
الجواب : ٥,٦ × ١٠⁻¹¹ إرج ، ٢,٤ × ١٠⁻⁷ إرج ،
٨ × ١٠⁻٦ إرج

مراجع مقترحة للاطلاع

Born, Max, "The Restless Universe", London, Blackie & Son, 1935.

الفصل الثانى عن الإلكترونات والأيونات عرض رائع للموضوع .

Dampier, Sir William, "A History of Science", New York, The Macmillan Co., 1946.

فى الصفحات من ٣٨٤ — ٣٨٩ وصف تاريخى لاكتشاف الإلكترون وخصائصه .

Millikan, R. A., "ELECTRONS (+ and —)" ,Chicago, University of Chicago Press, 1947.

يشرح الفصل الثالث والرابع والخامس الأبحاث السابقة لتعيين شحنة الإلكترون والكتاب سهل وممتع ودقيق .

Stranathan, J. D., "The Particles of Modern Physics", Philadelphia, The Blakiston Co., 1942.

يعطى الفصل الرابع القصة الكاملة لقياس نسبة الشحنة إلى الكتلة فى جسيمات أشعة الكاثود .

* * *

فولط تساوى ضعف فرق الجهد الذى استحثه على الحركة . وفى الفصول التالية ، وبخاصة فى الفيزياء النووية ، سوف نعبر عن الطاقة بالإلكترون فولط .

تمارين :

١ — ما هى القوة المؤثرة على إلكترون يتحرك بين لوحين متوازيين تفصلهما مسافة مقدارها ٠,٢ سم ، وبينهما فرق جهد مقداره ٦٠٠٠ فولط ؟ (تلميح : انظر بند ١٢ — ٣) .

الجواب : ٠,٠٥ ميكروداين

٢ — مجال مغنطيسى ٣ × ١٠ ^٩^ و . ا . س . متعامد مع مجال كهربى يقع بين لوحين متوازيين تفصلهما مسافة مقدارها ٠,١ سم . فإذا تحرك بين اللوحين إلكترون بسرعة ٥ × ١٠^-٩^ سم/ث فى اتجاه عمودى على المجال المغنطيسى فما هو فرق الجهد الذى لو وضع بين اللوحين يمنع الإلكترون من الانحراف ؟

الجواب : ١,٥ و . ا . س . أى ٤٥٠ فولط

٣ — إذا كان المجال الكهربى فى المسألة (٢) صفراً فما هو نصف قطر انحناء مسار الإلكترون فى المجال المغنطيسى ؟

الجواب : ٣,١٦ سم

٤ — من معدل هبوط قطرة من الزيت بين لوحين أفقيين المسافة الفاصلة بينهما ٥ مم وجد أن كتلتها ٢,٢٦ × ١٠^-١٠^ جم . وقد لوحظ أن فرق جهد مقداره ٣٠٠٠ فولط بين اللوحين يكفى تماماً لموازنة القطرة . احسب الشحنة التى تحملها القطرة .

الجواب : ٢٣ مرة قدر شحنة الإلكترون

٥ — ما مقدار الطاقة التى يكتسبها إلكترون لو سقط خلال فرق جهد مقداره ٧٥٠ فولط ؟ وما سرعته ؟

الجواب : ١٢ × ١٠^-١٠^ إرج ، ١,٦٣ × ١٠^٩^ سم/ث

ع = ١,٨٨ × ١٠^٩ سم/ث

= ١١٧٠٠ ميل/ث

ويستطيع هذا الإلكترون أن يقطع فى حيز مفرغ مسافة ميل فى مدة ٨٥ جزءاً من مليون من الثانية .

١٧ ــ ١٠ الإلكترون فولط كوحدة للطاقة :

لما كانت معظم الطرق المستخدمة فى المعمل للحصول على جسيمات كبيرة الطاقة تتوقف على تعجيل الجسيمات فى التحرك بين إلكترودين بينهما فرق جهد ، لهذا كان من المألوف فى الفيزياء الذرية والنووية أن تقاس طاقة هذه الجسيمات بوحدة جديدة بدلالة فرق الجهد . أما هذه الوحدة فهى الإلكترون فولط ، أو فى حالة الطاقات العالية ، المليون إلكترون فولط . وعلى سبيل الإيجاز تكتب هذه الوحدات أف ، م أف على التوالى (تستعمل أحياناً وحدة أخرى هى الألف إلكترون فولط ،وتكتب ايجازاً ا. ا. ف .) . ويعرف الإلكترون فولط بالطاقة التى يكتسبها جسيم شحنته ١٦ × ١٠^-٢٠ كولوم إذا سقط خلال فرق جهد مقداره فولط واحد . والعلاقة بين الإلكترون فولط وبين الوحدة الأساسية للطاقة هى :

الشغل ش = ف س = (١ فولط) × (١٦ × ١٠^-٢٠ كولوم)

الإلكترون فولط = ١٦ × ١٠^-٢٠ چول

= ١٦ × ١٠^-١٣ إرج

وبناء عليه ، فالإلكترون فى المسألة السابقة لدى سقوطه خلال فرق جهد قدره ١٠٠٠ فولط يكتسب طاقة تبلغ ١٠٠٠ إلكترون فولط ، أى ١٦ × ١٠^-١٣ × ١٠٠٠ = ١٦ × ١٠^-١٠ إرج . ولما كان الأيون الموجب الأحادى التأين يمتلك شحنة تساوى عددياً شحنة الإلكترون ، فهو يكتسب الطاقة نفسها التى يكتسبها الإلكترون إذا سقط كلاهما خلال فرق الجهد نفسه . ولكن ينبغى أن نلاحظ أن سرعة الأيون تكون أقل كثيراً . إذ أن كتلة تزيد كثيراً عن كتلته الإلكترون . وإذا كان الأيون ثنائى التأين ، سواء أكان موجباً أم سالباً ، فطاقته بالإلكترون

ينبغي أن تسمى الكتلة التي حسبناها للالكترون كتلة السكون . أما مقدار السرعة التي يمكن أن يتحرك بها إلكترون دون أن تتغير كتلته تغيراً محسوساً ، فهذا ما يحدده الحساب المبني على النظرية النسبية .

١٧ – ٩ حساب السرعات الإلكترونية :

حينما تتسارع الإلكترونات خلال فرق جهد ف ، فإن الشغل المبذول على الشحنة يكون

ش = ف س

وهو يساوي طاقة الحركة التي يكتسبها الإلكترون . ومتى كان فرق الجهد أقل من بضعة آلاف فولط ، يمكننا أن نتجاوز عن الزيادة الكتلية التي تقتضيها النظرية النسبية ، ويكون

$$\text{ف س} = \frac{1}{2}\ \text{ك ع}^{2}$$

حيث ك كتلة السكون للإلكترون . ومن ذلك يمكننا تعيين السرعة بمعلومية ف س ، ك .

مثال : إذا فرضنا أن إلكترونا ساكناً قد بدأ الحركة من الكاثود تحت تأثير فرق جهد مقداره ١٠٠٠ فولط ، فما مقدار الطاقة التي يكتسبها ، وما هي سرعته النهائية حينما يصطدم بالأثود .

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}\ \text{ك ع}^{2} = \text{ف س} = ١٠٠٠ \times ١٦ \times ١٠^{-٢٠}$$

$= ١٦ \times ١٠^{-١٧}$ چول (وحدات عملية)

$= ١٦ \times ١٠^{-١٠}$ إرج (وحدات س . ج . ث .)

وتولد هذه الطاقة الضئيلة سرعة كبيرة جداً في الإلكترون ، وذلك لأن

$$\frac{1}{2}\ \text{ك ع}^{2} = ١٦ \times ١٠^{-٢٨}$$

$$\therefore \frac{1}{2} \times ٩,١ \times ١٠^{-١٠} \times \text{ع}^{2} = ١٦ \times ١٠^{-١٠}$$

$$\therefore \text{ع}^{2} = ٣,٥٢ \times ١٠^{١٨}$$

وبالوحدات الإلكتروستاتيكية ،

شحنة الإلكترون = ٤,٨٠ × ١٠$^{-١٠}$ و . إ . س .

وقد هيأت تجربة مليكان برهاناً ناصعاً على أن شحنة الإلكترون مقدار ثابت ، له القيمة نفسها لكافة الإلكترونات. وقد عجزت تماماً التجارب المتكررة عن إثبات وجود كسر من هذه القيمة . ويتبع ذلك أن شحنة الإلكترون هي « ذرة » الكهربا ، وأن كل الشحنات الأخرى إنما هي مضاعفات صحيحة لها . وبالإضافة إلى ذلك ، فقد وجد ، بتجارب أجريت على قطرات مشحونة بشحنة موجبة ، أن وحدة الشحنة الأولية هي القيمة السابقة ذاتها . ويتضمن ذلك ما سبق أن افترضناه من أن الأيون الموجب هو ذرة أو جزيء ينقصه إلكترون واحد أو أكثر وأن الأيون السالب هو ذرة أو جزيء يحتوي على فائض من الإلكترونات .

وكما ذكرنا في بند ١٣ — ٦ ، يمكن تعيين عدد أفوجادرو بضم نتائج تجارب التحليل الكهربي إلى نتيجة تجربة « مليكان » عن قيمة شحنة الإلكترون . ويبين لنا ذلك نتيجة واحدة من النتائج الجانبية الهامة لمعرفتنا بشحنة الإلكترون .

١٧ — ٨ كتلة الإلكترون :

يمكننا الآن أن نعود إلى تجربة « طومسون » لتعيين كتلة الإلكترون. فقد وجدنا من تلك التجربة أن

$$\frac{س}{ك} = ١٧,٦ \times ١٠^{٧} \text{ كولوم / جم}$$

ومن نتائج « مليكان »

$$س = ١٦,٠ \times ١٠^{-٢٠} \text{ كولوم}$$

وعليه ، فإن كتلة الإلكترون

$$ك = ٩,١١ \times ١٠^{-٢٨} \text{ جم}$$

ويعتبر الإلكترون أخف جسم وجد حتى الآن في الطبيعة .

وسوف نرى ، في الفصل العشرين ، أن النظرية النسبية تقضي بأن الجسم المتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء يعاني زيادة ملحوظة في وزنه . وعليه ،

تكتسب شحنة عدة إلكترونات ، بل ليس ما يمنعها من أن تغير عدد شحناتها بين آن وآخر . وفى الواقع استطاع مليكان ، بتعريض الحيز بين اللوحين تعريضاً متقطعاً لأشعة إكس ، أن يغير الشحنة التى تحملها أى قطرة واحدة ، وكان يستدل على هذا التغير بمشاهدة التغيرات المفاجئة التى تطرأ على السرعة النهائية للقطرة فى الاتجاه العلوى ، وبإبقاء قطرة واحدة فى مجال الرؤية فى المجهر (الميكروسكوب) ، وبالسماح لها بالهبوط تارة ، ثم بجذبها إلى أعلى ، بوساطة المجال ، ثم بتركها تهبط تارة أخرى ، وهلم جرًّا ، ولكن دون أن يسمح لها أبداً بالالتصاق بأى من اللوحين ، حصل مليكان على بيانات من النوع التالى :

س = ٣٢ × ١٠ $^{-٢٠}$ كولوم

س = ٨٠ × ١٠ $^{-٢٠}$ كولوم

س = ٦٤ × ١٠ $^{-٢٠}$ كولوم

س = ١١٢ × ١٠ $^{-٢٠}$ كولوم

س = ٤٨ × ١٠ $^{-٢٠}$ كولوم

والمظهر البارز فى هذه البيانات يكمن فى وجود مضروب مشترك فيها كلها ، إذ أن

٣٢ × ١٠ ^{٢٠} = ٣ × ١٦ × ١٠ $^{-٢٠}$

٨٠ × ١٠ ^{٢٠} = ٥ × ١٦ × ١٠ $^{-٢٠}$

٦٤ × ١٠ $^{-٢٠}$ = ٤ × ١٦ × ١٠ $^{-٢٠}$

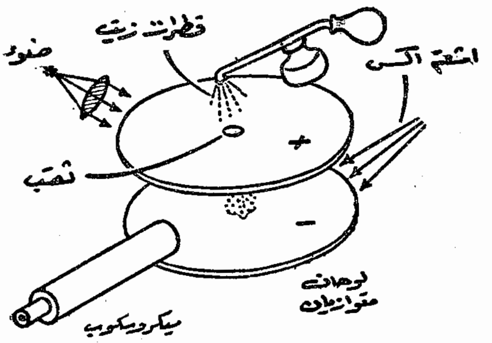
١١٢ × ١٠ $^{-٢٠}$ = ٧ × ١٦ × ١٠ ^{٢٠}

٤٨ × ١٠ $^{-٢٠}$ = ٣ × ١٦ × ١٠ $^{-٢٠}$

ولم يجد « مليكان » أبداً قيمة للشحنة لاتساوى مضروباً صحيحاً للمقدار ١٦ × ١٠ ^{٢٠} كولوم . النتيجة التى لامفر منها إذن ، هى أن المقدار ١٦ × ١٠ $^{-٢٠}$ كولوم لابد أن يكون الوحدة الأولية للشحنة التى كانت القطرة تلتقطها وتفقدها ، وبالتالى لابد أن يكون هو شحنة الإلكترون . وعليه فإن

شحنة الإلكترون = ١٦,٠ × ١٠ $^{-٢٠}$ كولوم

ويرى في شكل ١٧ — ٥ رسم توضيحي لجهاز مليكان. ولإجراء التجربة يرش رذاذ من قطرات الزيت فوق زوج من الألواح بينهما فرق جهد يبلغ بضع مئات من الفولط. وفي اللوح العلوي ثقب مركزي يسمح لقطرات قلائل بالدخول إلى



(شكل ١٧ — ٥)

الحيز الهوائي بين اللوحين. وفي غياب المجال الكهربي تسقط القطرات بطبيعة الحال تحت وطأة ثقلها.. أي بتأثير قوة الجاذبية الأرضية. ونظراً لوجود قوة احتكاك كبيرة للهواء تعرقل فعل الجاذبية، فإن سرعة الهبوط لا تتزايد بانتظام على طول الخط، كما هو الشأن في الهبوط الحر، ولكنها لا تلبث أن تثبت على قيمة تعرف بالسرعة النهائية، وبعد ذلك يستمر الهبوط بمعدل ثابت. وتتوقف هذه السرعة النهائية على حجم وكتلة القطرة، وهي تتناسب مع القوة المؤثرة (أي مع ك ح في هذه الحالة حيث ك الكتلة، ح عجلة الجاذبية الأرضية). فإذا كانت كثافة الزيت معلومة فمن السهل حساب كتلة القطرة بقياس سرعتها النهائية.

وإذا ما أثرنا على اللوحين بفرق جهد، على أن يكون اللوح العلوي موجباً مثلا، فالقطرات التي تكتسب من أيونات الهواء شحنات سالبة تأخذ في الحركة إلى أعلى بسبب التجاذب الإلكتروستاتيكي. في هذه الحالة تكون محصلة القوة التي تؤثر إلى أعلى على قطرة شحنتها سـ هي:

ق = م سـ — ك ح

حيث م المجال الكهربي الناتج من فرق الجهد بين اللوحين. وبقياس السرعة النهائية مرة أخرى يمكن إيجاد القوة الإلكتروستاتيكية م سـ، وحيث إن المجال م معروف فمن السهل، إيجاد الشحنة سـ التي تحملها القطرة. ولم يفترض مليكان بالطبع أن القطرة لم تلتقط إلا شحنة إلكترون واحد، فليس ثمة ما يمنعها من أن

ولما كانت هذه القوة متسببة عن حركة شحنة فى مجال مغنطيسى ، لذا يمكننا أن نكتب

$$ق = س\, ع\, هـ = \frac{ك\, ع^{٢}}{نق}$$

$$\text{أى أن}\quad \frac{س}{ك} = \frac{ع}{هـ\, نق}$$

وبقياس انحراف الحزمة ، يمكن تعيين نصف قطر المسار نق من اعتبارات هندسية بسيطة . وقد سبق أن رأينا من الجزء الأول من التجربة أن $ع = \frac{م}{هـ}$ وعليه ، فبالتعويض عن ع نجد أن

$$\frac{س}{ك} = \frac{م}{هـ^{٢}\, نق}$$

وبما أن كل الكميات الموجودة فى الطرف الأيسر يمكن قياسها ، فقيمة نسبة الشحنة إلى الكتلة فى جسيمات أشعة الكاثود يمكن تعيينها . وقد وجد أن

$$\frac{س}{ك} = ١٧,٦ \times ١٠^{٧} \text{ كولوم / جم} = ٥,٢٧ \times ١٠^{١٧} \text{ و.إ.س / جم}$$

وقد صمم طومسون فكرة هذه التجربة ونفذها عام ١٨٩٧ . ومع أنه لم يستطع أن يعين لا الشحنة ولا الكتلة كلا على حدة ، فقد نجح فى تحقيق أن أشعة الكاثود تتألف من جسيمات نسبة الشحنة إلى الكتلة فيها محددة وتتساوى فى كل أنواع أشعة الكاثود . وقد سميت جسيمات هذه الأشعة بالالكترونات (وهو اصطلاح كان قد اقترحه ستونى Stoney) . ويعزى إلى « طومسون » كل الفضل فى معرفة كنهها وتشخيصها .

١٧ — ٧ قياس شحنة الإلكترون — تجربة قطرة الزيت لمليكان :

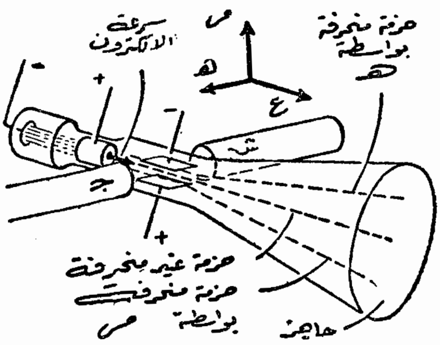
لقد ظهر لنا من تجربة طومسون أن تعيين ، إما الشحنة س وإما الكتلة ك ، تعيينا منفصلا أمر لازم إذا أردنا معرفة كليهما . وقد دارت أبحاث عديدة فى ذلك الميدان كانت أعظمها نجاحاً تجارب ر . ا . مليكان ، الذى بدأ قياساته عام ١٩٠٦ ثم أعادها وحسنها فى السنوات التالية .

ق م = م س

فإذا جعلنا هاتين القوتين متساويتين (وذلك بضبط قيمة م مثلا) فإن صافى القوة المؤثرة على الجسيمات المشحونة يصبح صفراً، ولا تعانى الأشعة أى انحراف. وفى هذه الحالة يكون

س ع هـ = م س

أى أن ع = م / هـ .



(شكل ١٧ – ٤)

يتضح من ذلك أنه لا تتأتى موازنة القوتين المؤثرتين على كل الجسيمات بوساطة المجالين م ، هـ ما لم تكن الجسيمات كلها متحركة بالسرعة ع نفسها. وبتعبير آخر، إذا أمكننا عند ضبط م لتلاشى الانحراف أن نحصل على حزمة حادة واضحة كان لنا أن نجزم بأن كل الجسيمات تتحرك بالسرعة نفسها. وقد كان هذا ما لوحظ فى الواقع، مما يدل على أن كل خيوط أشعة الكاثود تبدأ رحلتها عند (أو على مقربة من) الكاثود فى أنبوبة التفريغ الغازية اذ أنها جميعها تكتسب نفس السرعة وبداهة، كان يمكننا أن نضمن تساوى السرعة إذا استعضنا عن أنبوبة التفريغ الغازية بمصدر حرارى تنبعث منه الإلكترونات أى بفتيل ساخن، ولكن هذه الوسيلة لم تكن متاحة وقت إجراء هذه التجربة لأول مرة .

ويتضمن الجزء الثانى من التجربة أن نجعل م = صفراً. ومتى تم ذلك يحدث فى الحزمة انحراف إلى أعلى بسبب فعل المجال هـ ، وتنحنى الحزمة عن خط سيرها الطبيعى المستقيم فترسم قوساً من دائرة خلال فترة وجودها داخل المجال (انظر شكل ١٤ – ١٤). والقوة المؤثرة عليها هى قطعاً قوة تشدها نحو مركز القوس (انظر بند ١٤ – ١٠) وتعادل القوة المركزية المطاردة. فإذا كانت كتلة كل جسيم هى ك ، فإن قه = ك ع٢ / نق

فى الصمام الثلاثى ، ووظيفته السيطرة على تيار حزمة الإلكترونات ، مما يهيئ لكل نقطة على كل خط أن تكون إما مضيئة وإما مظلمة . وفقاً للإشارة التى يبعث بها مرسل التلفزيون . وخلاصة التوارد السريع لكل هذه النقط المضيئة والمظلمة أن تظهر على الحاجز الفلورى صورة كاملة للجسم المعروض للتلفزة .

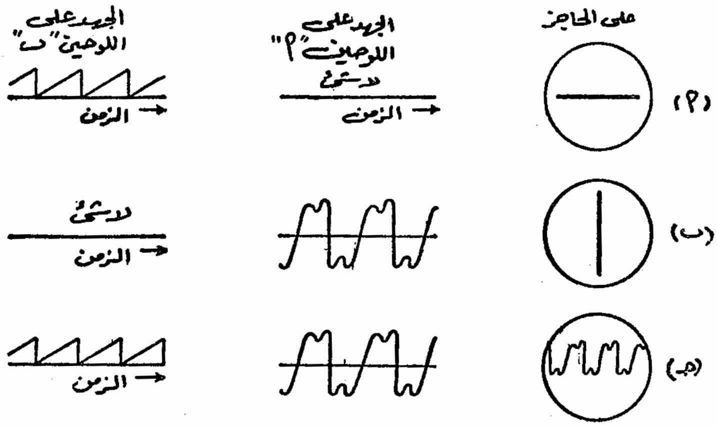
١٧ ـــ ٦ قياس $\frac{س}{ك}$ للإلكترون ـــ تجربة ج . ج . طومسون :

نحن الآن إزاء أول لقاء لنا مع تجربة من التجارب العديدة التى يؤدى تفسيرها مباشرة إلى إضافة معالم جديدة لصورة الميكروفيزياء . وفى التجربة التى نحن بصددها تنحرف حزمة من إشعاعات الكاثود بوساطة مجال كهربى ومجال مغنطيسى . وهذا ممكن ، لأن المعروف أن هذه الأشعة تتألف من شحنات سالبة فى حالة حركة خطية . (تنجذب الأشعة للإلكترود الموجب) . وقد رأينا فى الفصل الرابع عشر أن الشحنة المتحركة تعانى قوة فى مستوى عمودى على المجال المغنطيسى . وعليه ، ففى الإمكان إحناء أشعة الكاثود سواء بالمجال الإلكتروستاتيكى أو المجال المغنطيسى ، أو بكليهما . وفى جهاز طومسون المبين فى شكل ١٧ ـــ ٤ ، يقع المجال المغنطيسى متعامداً على المجال الكهربى . وبفضل المجال المغنطيسى هـ وحده ، وفى غياب المجال الكهربى ، تنحرف الحزمة رأسيًّا إلى أعلى (يجب ألا يغرب عن البال أننا نتعامل الآن مع جسيمات سالبة الشحنة) . وقد مر بنا فى البند ١٤ ـــ ٨ أن القوة المؤثرة على شحنة س تتحرك فى مجال مغنطيسى هـ هى $ق = س \overleftarrow{ع} هـ$. وسوف نحتفظ بالرمز س للدلالة على شحنة الإلكترون ، ولو أن شحنة الإلكترون لها من الأهمية فى الفيزياء ما يبرر لنا أن نفرد لها رمزاً خاصًّا . وحينئذ ، فالقوة الإلكترومغنطيسية $ق_{هـ}$ المؤثرة على الإلكترون بسبب حركته فى المجال المغنطيسى هى

$$ق_{هـ} = س \overleftarrow{ع} هـ$$

وبسبب المجال الإلكتروستاتيكى م وحده ، عند غياب المجال المغنطيسى ، تنحرف أشعة الكاثود السالبة الشحنة انحرافاً رأسيًّا إلى أسفل . وتتعين القوة الإلكتروستاتيكية الحارفة $ق_{م}$ من تعريف المجال الكهربى م ، ومقدارها هو :

ب فرق جهد يزداد بانتظام مع الزمن تأخذ الحزمة فى الحركة عبر الحاجز فى الاتجاه الأفقى بمعدل منتظم ، حتى إذا بطل فرق الجهد هذا تعود الحزمة أدراجها إلى وضعها الأصلى . يسمى فرق الجهد الذى له هذه الصفة بفرق الجهد « الماسح » وصورته البيانية يمثلها شكل ١٧ — ٣ أ . فإذا وصلنا اللوحين ا بمصدر فرق جهد متغير فى الوقت نفسه الذى يعمل فيه فرق الجهد الماسح على اللوحين الآخرين تنتشر الحركة الرأسية على القرص الفلورى فى الاتجاه الأفقى ، كما لو كانت فى الأصل مطوية أو منطبقة على بعضها . وبهذا تظهر صورة تغيرات فرق الجهد المؤثر على اللوحين ا . ويبين شكل ١٧ — ٣ حـ صورة هذه التغيرات كما نراها على الحاجز . وإذا جعلنا الجهد الماسح المؤثر على اللوحين ب يكرر نفسه فى توقيت يتمشى مع دورة فرق الجهد على اللوحين ا ، فإن الصورة المعروضة تكرر



(شكل ١٧ — ٣)

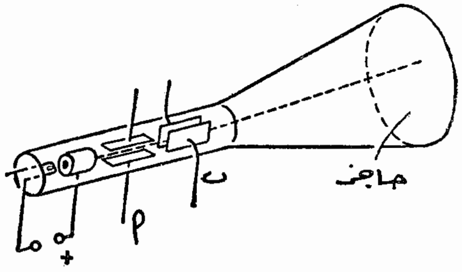
نفسها مراراً على المكان نفسه من الحاجز فتبدو كما لو كانت رسما ثابتاً . وتسمى أنبوبة أشعة الكاثود هذه مع الدوائر الكهربية الملحقة بها بمنظار الذبذبات ذى الشعاع الكاثودى أو الاسيلوسكوب . وهو جهاز يسمح لنا « برؤية » التغيرات فى إشارة كهربية .

وفى أنبوبة جهاز العرض التلفزيونى يستخدم جهدان ماسحان لتكوين مجموعة من بضع مئات من الخطوط الأفقية المتقاربة . ويوجد إلكترود إضافى يشابه الشبكة

لنا أهمية الفقرات الأخيرة . فعند الضغوط البالغة الانخفاض تمدنا أنبوبة التفريغ الغازية بتيار من الإلكترونات السريعة جداً المنسلخة من والداتها الذرات . وقد اكتشفت هذه التيارات قبل علمنا بوجود الإلكترون . وبما أنها ترد من منطقة الكاثود فقد سميت بأشعة الكاثود . ويلاحظ أنها ، رغم هذه التسمية ، ليست أشعة بالمعنى المقصود فى موجات الضوء، إذ أنها أشبه شيء بجسيمات عالية السرعة. وقد رأينا فى الفصل السابق أن لدينا الآن طريقة أبسط للحصول على الإلكترونات ، ألا وهى الانبعاث الثرميونى من فتيل ساخن . ويستخدم فى أنبوبة أشعة الكاثود الحديثة (شكل ١٧ — ٢) فتيل ساخن موضوع فى أنبوبة مفرغة من الهواء تفريغاً عالياً . فإذا صنع الأنود مثقوباً بثقب محورى صغير ، فإن أشعة الكاثود تخرج منه بشكل حزمة تحدث آثاراً فلوريسية عند نقطة التقائها بحاجز يقع فى نهاية الأنبوبة . وبما أن تفلور الزجاج ضعيف ، فالمعتاد أن يغطى الحاجز بملح يتفلور بضوء ناصع مثل كبريتور الخارصين .

١٧ — ٥ الأسيلوسكوب أو منظار الذبذبات ذو الشعاع الكاثودى:

فى أنبوبة أشعة الكاثود الحديثة المستخدمة فى منظار الذبذبات وفى جهاز الاستقبال التليفزيونى تنطلق حزمة من الإلكترونات فترتطم بحاجز فلورى . وفى النوع الشائع لهذه الأنابيب تتكون حزمة ضيقة من الإلكترونات تمر خلال زوجين



(شكل ١٧ — ٢)

من الألواح كما يتبين من شكل ١٧ — ٢ . فإذا وصلنا فرق جهد على زوج الألواح ا ، تنعطف حزمة الإلكترونات قليلا نحو اللوح الموجب (كما تبتعد قليلا عن اللوح السالب) فتعانى انحرافاً فى الاتجاه الرأسى . وبالمثل ، إذا وصل فرق جهد بزوج الألواح ب فإنه يحدث انحرافاً أفقيًّا . وعليه، فإذا وصل بزوج الألواح

إلى الالتئام لتكون ذرات متعادلة قبل أن تقطع شوطاً بعيداً فى حركتها . ولكن بانخفاض الضغط يقل احتمال تصادمها بالذرات ، فيمكنها بفضل المجال أن تكتسب من السرعة ما يكفى ليجعلها تؤين الجزيئات الواقعة فى طريقها ، وبذلك تتكون الغازات فى ممرات مؤينة بشكل قنوات أو شرايين . ويمكن رؤية هذه الممرات بسبب الضوء الذى ينبعث عند التئام الأيونات ، كما ينبعث أيضاً من ذرات أخرى فى الطريق أصيبت من الأيونات المتسارعة بصدمات أخف وطأة ، فلم تتأين ولم تنطرد منها إلكترونات ، ولكن إلكتروناتها أزيحت فقط إلى مدارات أخرى ثم عادت إلى حالتها الطبيعية المعتادة عقب زوال الصدمة ، (سندرس الإشعاع الضوئى الكهربى فيما بعد) . وبموالاة تخفيض الضغط يمكن أن يتم التوصيل على امتداد أى ممر خلال الأنبوبة ، وبذلك تمتلئ الأنبوبة بالضوء (يحدث هذا فى منطقة الضغط المستعمل فى ملء أنابيب النيون المضيئة) . وسوف نتغاضى عن التعقيدات التى تطرأ عند الضغوط القريبة من بضعة أجزاء من المليمتر ، إذ أنها لا تضيف كثيراً إلى ما يلزمنا لتشخيص الإلكترون . أما نطاق الضغط الذى يختفى فيه الضوء الناشئ من التفريغ الكهربى فهو ما يهمنا كثيراً . فعند هذا الضغط المنخفض لا يوجد فى الأنبوبة من الذرات أو الجزيئات إلا بضعة أجزاء من مليون من العدد الأصلى ، ويستطيع الأيون أن يقطع كل المسافة بين الإلكترودين دون أن يعانى تصادماً . ولذا فالإلكترون الذى يبدأ السير على مقربة من الكاثود يكتسب سرعة عالية جداً خلال الوقت الذى يصل فيه إلى الأنود . ولما كانت التصادمات فى الغاز نادرة ، فلن يحدث من الإشعاع ما يكفى لجعل الغاز مرئياً . أما ظهور الأثر الفلورى على الجدران الزجاجية فمرده إلى ارتطام الإلكترونات بها مباشرة ، وكذلك إلى امتصاص الزجاج لأشعة إكس ، التى تتولد لدى اصطدام الإلكترونات بالأنود ، وهى ظاهرة سوف نناقشها فى فصل قادم.

١٧ ــ ٤ أشعة الكاثود :

إذا سلمنا بصحة التعليل السابق عن التوصيل فى الغازات فسوف تبدئ

الحركة الانتقالية . وفى مثل هذه المواد تقوم الإلكترونات بتأدية الحركة عند حدوث التوصيل الكهربى . أما فى الغازات ، فللذرات والجزيئات حظ كبير فى حرية الحركة ، ولهذا علينا أن نتوقع الحركة فى كل من الأيونات الموجبة والأيونات السالبة ، وتؤدى هذه الحركة فى النهاية إلى وصول بعض الأيونات إلى الإلكترودين . ولما كان التيار ، وفقاً لتعريفه ، هو ما ينشأ من سريان الشحنات ، لهذا ينتج من حركة الأيونات توصيل كهربى فى الغاز .

وتحت الظروف المعتادة ، يوجد دائماً ، عدد قليل من الأيونات فى أى عينة من الغاز . وتتولد هذه الأيونات الابتدائية بفعل الشوائب ذات النشاط الإشعاعى الموجودة فى الوسط ، وكذلك بفعل الأشعة الكونية ، وطريقة توليدها تشابه إلى حد كبير الطريقة التى تتكاثر بها الأيونات نفسها عند حدوث تفريغ كهربى فى الغاز ، أو بوساطة التصادم بين جسيمات الأشعة الكونية السريعة الحركة أو الجسيمات المنطلقة من المواد المشعة وبين جزيئات الغاز . ففى مثل هذه التصادمات قد تتمزق الذرة المتعادلة من قوة الصدمة فيتصل منها إلكترون وتصبح أيوناً موجباً وإلكتروناً حرًّا. ومع أن الأيون والألكترون سرعان ما قد يجتمعان لتكوين جزىء متعادل ، غير أن ذلك لا يمنع من وجود عدد ضئيل من الأيونات الغازية فى أى لحظة .

فإذا تعرض الغاز لفعل مجال كهربى فالإلكترونات الحرة والأيونات التى انطلقت بتأثير عملية التأين الابتدائية (أى بتأثير الأشعة الكونية والمواد المشعة) تأخذ فى اتساع حتى تصبح هى نفسها قذائف عالية السرعة يمكنها طرد إلكترونات من الذرات التى تعترض طريقها . ومعظم هذا التأين الثانوى تحدثه الالكترونات السريعة ، إذ أن لها حظًّا أوفى فى الانطلاق مسافة تكفى لاكسابها الطاقة اللازمة للتأيين الجديد . أما الأيونات الموجبة فمساراتها أقصر بسبب التصادمات ، وقلما تكتسب من الطاقة ما يكفى لإحداث التأين ، إذ أن كل تصادم يفقدها بعض طاقة الحركة .

وتحت الضغط الجوى المعتاد ، إذا لم يكن المجال الكهربى شديدا جدا . تعود عوامل التأين الممكنة ، وهى الإلكترونات الحرة والأيونات الابتدائية ، تعود

الغاز . وعند ذلك الضغط (وهو ٥ مم من الزئبق) تعمل الأنبوبة كأنابيب النيون المألوفة فى الإعلانات الضوئية، بل الأصوب فى هذه الحالة أن نقول : إنها تعمل كأنابيب النيتروجين المضيئة .

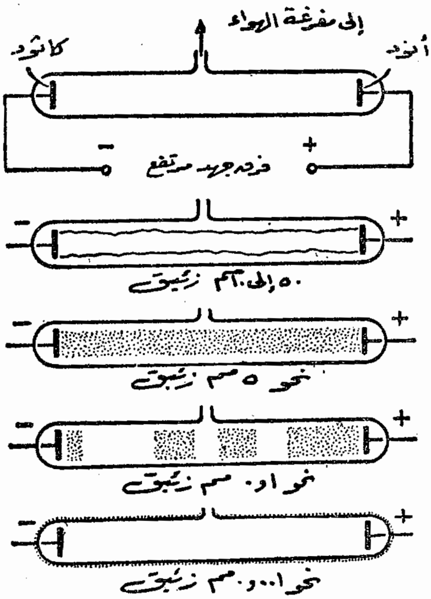
وتخفيض الضغط عن ذلك الحد يدخل فى مظهر التفريغ الكهربى تعقيدات جديدة . فعند ضغط ١,٠ مم تقريباً يبطل انتظام التوزيع فى الإضاءة ، إذ تظهر بالتبادل مناطق متوهجة تتخللها مناطق مظلمة . وأهم هذه المناطق هى المنطقة المظلمة المحيطة بالكاثود . واستمرار تخفيض الضغط يترتب عليه نمو هذا الحيز المظلم ، حتى إذا هبط الضغط إلى ٠,٠٠١ مم الزئبق يسود الظلام سائر الأنبوبة — ويختفى كل توهج فى النيتروجين . ومع أن الغاز نفسه لا يضىء ، فجدران الأنبوبة الزجاجية ينبعث منها وهج خافت مخضر يسمى ضوء فلورى .

١٧ — ٣ ميكانية التوصيل الغازى :

إن التفريغ الكهربى خلال الغازات عملية لا تخلو من التعقيد . ولهذا ، فسوف نقتصر فى نقاشنا على لمس أبسط الجوانب ، بل حتى فى هذا النقاش سنضطر إلى أن نسبق الحوادث ونتكهن بما نحن نحاول فى الواقع أن نفسره فى هذا البند ، ألا وهو تركيب الذرة (وقد سبق أن لجأنا إلى مثل ذلك فى الفصل الحادى عشر) .

تتألف الذرة من نواة موجبة الشحنة تحيط بها سحابة من الإلكترونات السالبة تكفى شحنتها تماماً لموازنة شحنة النواة . فإذا خرج الكترون من الذرة بأى كيفية كانت ، ينقلب ميزان الشحنة ، وتصبح الذره موجبة الشحنة ، وبالمثل ، إذا أضيف الكترون إلى قائمة النزلاء فى الذرة المعتادة . تصبح الذرة سالبة الشحنة . وبسبب هذه الشحنة تعانى هذه الذرات قوة إذا وجدت فى المجال الكهربى (ق = م ش) وبذلك تكتسب عجلة . وتسمى هذه الذرات المشحونة بالأيونات، التى سبق أن نوهنا عنها فى الفصل الحادى عشر . وتتوقف حركة الأيون على الازدحام فى الوسط المحيط به . وفى معظم الجوامد تكون الأيونات مصفوفة فى تلاصق لا يتيح لها حرية

فى الهواء الجوى المعتاد لا يمكننا إمرار الكهربا فى فجوة اتساعها ١ سم تقع بين كرتين معدنيتين إلا إذا رفعنا فرق الجهد بينهما إلى نحو ٣٠٠٠٠ فولط . ولكن ، ابتداء من عام ١٨٥٠ تقدمت طرق الحصول على فراغ جيد ، ثم لوحظ أن الغاز يتحسن توصيله بالكهربا تحسناً كبيراً عند خفض الضغط . ويبين شكل ١٧ — ١ أنبوبة زجاجية طويلة متصلة بمضخة للتفريغ تعمل على سحب الهواء من الأنبوبة . ويلتحم قرص معدنى بالأنبوبة عند كل من نهايتيها . وكل يمكن تعريضه لفرق جهد يسمى بالالكترود (أو القطب) . ويسمى الالكترود الذى يعطى جهداً موجباً بالأنود ، أما الالكترود الذى يعطى جهداً سالباً فيسمى بالكاثود . فإذا وضع فرق جهد مقداره بضعة آلاف بين الالكترودين ، ثم أخذت مضخة التفريغ تعمل ، تتسلسل مشاهدة الظواهر الموضحة فى شكل ١٧ — ١ .



(شكل ١٧ — ١)

فى مبدأ الأمر عند ما يكون ضغط الغاز فى الأنبوبة مساوياً الضغط الجوى (الذى قيمته المعتادة ٧٦٠ مم من الزئبق) لا يحدث توصيل كهربى . وكلما انخفض الضغط إلى المنطقة ما بين ٥٠ إلى ١٠ مم من الزئبق تظهر تفريغات كهربية بشكل مجموعة من الخطوط الرفيعة الشبيهة بقنوات المياه . ثم تزداد هذه المجارى فى العدد ، حتى إذا هبط الضغط إلى نحو ٥ مم اندمجت كلها معاً وملأت تماماً الحيز الواقع بين الإلكترودين . وبذلك تعطى الأنبوبة مظهراً وهاجاً . فإذا كان الغاز هواء يتخذ التفريغ الكهربى لوناً قرمزيًّا ، وإذا كان الغاز هو النيون يكون اللون أحمر برتقاليًّا ، وإذا كان الغاز هو الأرجون يكون اللون أزرق ، وهلم جرّا — أى أن اللون يتوقف على طبيعة

واقعة فى الميكروفيزياء ؟ كل هذه الأسئلة سليمة ومعقولة . وكثيراً ما يسأل فيلسوف الفيزياء نفسه هذه الأسئلة وأسئلة أخرى عديدة تشبهها . فالذرة بنواتها والكتروناتها من الصغر بحيث لا ترى . وأصغر مجموعة من الذرات أمكن رصدها إلى الآن (بوساطة الميكروسكوب الالكترونى) تحتوى على بضع مئات الآلاف من الذرات ومع ذلك ، فمجرد هذا القول يدل على أننا نعلم أن هناك ذرات — وقد عددناها بالفعل . وحقيقة الأمر أن عدم إدراكنا لوجود الذرات ليس بأقل من معرفتنا للتركيب الداخلى للذرة . وقد استطعنا من عدد كبير من الدلائل غير المباشرة أن ننشئ نموذجاً يشمل الجزيئات والذرات والالكترونات والنوى . ولابد أن يكون النموذج صالحاً إلى حد كبير ما دام قد فسر لنا الحقائق المشاهدة تفسيراً مرضياً ، فإذا جدت ظواهر يفشل النموذج فى تعليلها فلا مفر لنا من أن نغيره . والنظريات والنماذج فى الماكروفيزياء تحتاج منا إلى اجتهاد كبير إذا قيست بمثيلاتها فى الميكروفيزياء .

والهدف الذى نرمى إليه فى الأبواب القادمة هو عرض التجارب ، التى أدت إلى الدلائل غير المباشرة الخاصة بتركيب الذرة ، وكذلك عرض الجدل الذى قادنا إلى النتائج المستنبطة من هذه الدلائل . وكشف أوجه النقص فى النموذج الذى يكاد يتساوى فى الأهمية مع كشف أوجه النجاح فيه . ولكن انتصارات النموذج تبهرنا عادة إلى الحد الذى يجعلنا نقيم لها وزناً أكبر من الوزن الذى يقام لعيوبه ، وهذه هى حجتنا التى نتعلل بها فى المناقشات الطويلة التى سنوردها فيما يلى : وميدان الميكروفيزياء لا ينجب لنا الحقائق مباشرة ، ولكن الصور المنطقية التى يرسمها تؤدى بالباحث التجريبى إلى ظواهر حقيقية جداً يمكن مشاهدتها ورصدها .

١٧ — ٢ توصيل الكهربا خلال الغازات :

بزغت الدلائل التى أدت إلى تشخيص الالكترون — ومن ثم إلى الفكرة الأساسية عن كنه الشحنات الكهربية التى قدمناها فى الفصول السابقة — بزغت من تجارب على التوصيل الكهربى فى الغازات . كان المعروف قديماً أن الغازات عوازل جيدة .

أو الكترونا، وأية معلومات أو نتائج نستخلصها عنها إنما نصل إليها بمجرد الاستنتاج . والوسيلة المتبعة للحصول على هذه الاستنتاجات تنبنى على طريقة الاستقصاء أى الاستدلال العلمى الذى يؤدى بنا إلى نتائج لا سبيل أبداً إلى سواها إذا تمشينا مع المنطق . ونبدأ الدراسة أولا بمشاهدة ماكروفيزيائية (وكل المشاهدات لابد أن تكون ماكروفيزيائية) . وعلى ضوء هذه المشاهدة نكون صورة أو نموذجاً يفسر لنا الظاهرة الماكروفيزيائية بدلالة الدور الذى يؤديه كل جسم منفرد . ثم نستنجد بذلك النموذج ليعلل لنا مشاهدات أخرى ، وليتنبأ لنا بظواهر أخرى جديدة يحتمل وجودها . ويرتكز نجاح النموذج مباشرة على مقدرته على الوفاء بهذه المطالب . ومثال ذلك النموذج الجزيئى للمادة ، الذى أفادنا لا فى نظرية الحركة فى الغازات فحسب حيث فسر لنا لنا قوانين الغازات ، بل كذلك أعاننا على تفهم التوصيل الكهربى والانبعاث الثرميونى .

ولما كانت الفيزياء الذرية والنووية تقع بتمامها ضمن حدود الميكروفيزياء ، فسوف نبذل مجهوداً ضخماً فى إنشاء نماذج ، وسنحاول أن نفرض على هذه النماذج القوانين الفيزيائية نفسها التى تخضع لها الأجسام الكبيرة . وسنرى أن هذه المحاولة — وهى ميكانيكية فى جوهرها — كثيراً ما تبوء بالفشل . وللحصول على استنتاجات تساعدنا فى عمل النماذج يتعين علينا أن نحلل تحليلا دقيقاً ، تجارب ليست لها فى بعض الأحيان صلة قريبة مباشرة بالنموذج . وتشابه هذه العملية ما يتبعه عالم الفلك ، الذى عليه أن ينشئ نموذجاً للكون من مجرد إشارات ضوئية دقيقة يرصدها من فوق سطح الأرض . وتكشف لنا عملية تكوين النماذج هذه عن القيمة الكبيرة للاستقصاء المنطقى ، إذ أن أهمية النموذج تقاس بالتجارب التى يعللها . وفى العصور القديمة أنشأ فلاسفة المنطق نماذج حدثونا فيها عن « موسيقى الأجرام السماوية » ولكن الربط بينها وبين التجارب كان فى أغلب الأحيان تافهاً .

وقد يتساءل الطالب المتيقظ ، عما إذا كانت الخصائص الميكروفيزيائية التى نستنتجها هى حقائق فعلية لا يأتيها الباطل . ألا يحتمل وجود خطأ فى الخطوات الواقعة بين الدلائل المرصودة وبين النتائج المستنبطة ؟ وبالتالى ، هل هناك حقيقة

الفصل السابع عشر

تشخيص الإلكترون

١٧ ـ ١ الميكروفيزياء والماكروفيزياء :

فى دراستنا لديناميكا جسيم له كتلة والكتروديناميكا جسيم له شحنة وضعنا فرضاً ضمنياً لم ننص عليه صراحة ، ألا وهو أن نواميس الطبيعة التى تحكم التحركات والقوى فى مجموعة من الجسيمات تنطبق بحذافيرها على الجسيمات الأولية إذا أخذت فرادى . مثال ذلك ، بدأنا اشتقاق نظرية الحركة فى الغازات باعتبار حركة جزىء واحد . ثم بعملية أخذ متوسطات حصلنا على متوسط مربع السرعة ، وبذلك تحول اهتمامنا عن الجزىء الواحد إلى مجموعة من الجزيئات ، ونتجت عن ذلك نظرية أعطتنا عن الغاز صورة بدلالة جزىء افتراضى يمثل متوسط الصفات . ولم تمدنا هذه النظرية بأى معلومات محددة عن أى جزىء بالذات . ولنضرب مثلا آخر . من الواضح أن القوة بين تيارين كهربيين ترجع إلى الفعل المتبادل بين كل الشحنات التى تؤلف أحد التيارين وبين المجال المغنطيسى النتاتج من كل الشحنات فى التيار الثانى ، ونحن نفترض أن الإلكترون المنعزل يعانى نفس القوة ، التى يعانيها عند وجوده فى التيار فى صحبة الملايين من الالكترونات الأخرى . وبناء على هذا الافتراض استطعنا أن نحسب القوة المؤثرة على شحنة منفردة (ق = ش ع ه .)

وتسمى الدراسة الفيزيائية للمادة الموجودة فى حالة تجمع ـ أى المادة المتكتلة التى لها جرم كبير بحيث نستطيع أن نراها أو نلمسها ـ تسمى هذه الدراسة بالماكروفيزياء (وهو اصطلاح مشتق من اللفظة اليونانية « ماكرو » بمعنى كبير) . وتسمى دراسة الجسيمات أو الدقائق المتناهية فى الصغر ـ باعتبار هذه الجسيمات وحدات أساسية لها كيان خاص مميز ـ تسمى بالميكروفيزياء (وهو اصطلاح مشتق من اللفظة اليونانية « ميكرو » بمعنى صغير أو دقيق) . وتكون الظواهر الميكروفيزيائية دائماً خارجة عن نطاق حواسنا ـ فلا يمكننا مثلا أن نرى ذرة

الجزء الثالث

الظواهر الذرية والنووية

الأنود قد تغير من ١,٤ مللى أمبير إلى ٤,٦ مللى أمبير . احسب تكبير فرق الجهد للصمام .

الجواب : ٢١,٣

٣ — تحتوى دائرة الأنود فى مكبر صمامى على مقاومة مقدارها ١٠٠٠٠ أوم . وقد وجد أن تكبير فرق الجهد ١٥ . وعندما يكون جهد الشبكة — ٣ فولط يكون تيار الأنود ٨ مللى أمبير فى غياب أى إشارة على الشبكة . ما مقدار التغير فى تيار الأنود إذا تلقت الشبكة إشارة تيار متردد سعة فرق جهدها ٢ فولط ؟

الجواب : من ٥ إلى ١١ مللى أمبير

٤ — مقدار الإشارة التى يتلقاها هوائى جهاز راديو هو ٥ ميكروفولط . ما عدد مراحل التكبير التى تلزم لرفع هذه إلى الإشارة إلى ١٠ فولط أو أكثر ، علماً بأن تكبير فرق الجهد فى كل مرحلة هو ٥٠ مرة ؟

الجواب : ٤ مراحل

مراجع مقترحة للاطلاع

McArthur, E. D., "Electronics and Electron Tubes", Schenectady, New York, General Electric Co., 1933.

تحتوى الصفحات ٦ إلى ٢٢ على عناصر هندسة الأنابيب الالكترونية فى عبارة سلسة بقلم حجة فى الموضوع .

Stokley, James, "Electrons in Action", New York, McGraw-Hill Book Co., 1946.

يشرح هذا الكتاب الدور الذى تقوم به الالكترونات فى الكهربا التيارية وفى المواصلات والتليفزيون والرادار وغير ذلك وهو مكتوب لكى يفهمه عامة القراء .

* * *

وغرف التأين ، وراسم الذبذبات ذا الشعاع الكاثودى (الإسيلوجراف) ، والمتذبذبات التى تعمل فى نطاق الترددات المسموعة والإذاعية وفوق العالية ، ومنظمات فرق الجهد ، ومنابع القدرة — كل هذه الأدوات وسواها تشتمل على دوائر أنابيب الكترونية . ولولا الصمام الثلاثى لكان من المشكوك فيه أن نستطيع الحصول على الثروة العلمية النفسية التى لدينا الآن عن فيزياء الذرة والنواة .

ومع كل ذلك، فالجوانب الفنية والتطبيقية لموضوع الانبعاث الثرميونى لاتزيد أهميتها عن أهمية المعرفة الجوهرية الأصيلة التى أتاحتها لنا هذه الظاهرة بشأن طبيعة الإلكترونات . ولكى نتفهم ميكانية الانبعاث الثرميونى لجأنا إلى ثلاث صور أساسية للمادة ، وهى : دور الالكترون فى الفلزات ، ونظرية الحركة فى المادة ، وفكرة شحنة الحيز . (ولعله من الطريف أن نذكر أنه ليس بين هذه الصور صورة تنطبق بتفاصيلها الأصلية على الانبعاث الثرميونى) . وفوق هذا ، فقد أصبح الآن متاحاً لنا أن نفصل تماماً من صلب المادة تياراً من الإلكترونات فنفحصه وهو بمعزل عن عوامل الاضطراب الداخلية . وقد كانت النتيجة الحتمية لذلك حصولنا على معرفة واضحة فسرت لنا لاخواص الالكترون نفسه فحسب ، بل كذلك كنه المادة التى انبثق منها ، وسنحاول فى الفصول التالية أن نتتبع تقدم هذه المعرفة .

تمارين :

١ — تحتوى دائرة صمام ثنائى مقوم على مقاومة مقدارها ٢٠٠٠٠ أوم . . فإذا كان متوسط التيار المقوم هو ٢ ملى أمبير ، فما هو متوسط فرق الجهد المقوم عبر المقاومة ؟

الجواب : ٤٠ فولط

٢ — أثرت إشارة تيار متردد ، سعة فرق جهدها ١,٥ فولط ، على شبكة صمام ثلاثى مكبر . وكان جهد التحيز فى الشبكة هو — ٤ فولط . وكانت دائرة الأنود تحتوى على مقاومة مقدارها ٢٠٠٠٠ أوم . وقد وجد أن تيار

= ــ ١ فولط إلى ــ ٣ ــ ٢ = ــ ٥ فولط ، ويؤدى هذا إلى تغيير الجهد عبر م من ى$_٢$م إلى ى$_١$م ، أى من ى$_٢$ م = ٠,٠٠٧ × ١٠٠٠٠ = ٧٠ فولط إلى ى$_١$ م = ٠,٠٠٣×١٠٠٠٠=٣٠ فولط . وعليه، يكون تكبير فرق الجهد هو :

$$ت = \frac{٧٠ - ٣٠}{٥ - ١} = ١٠$$

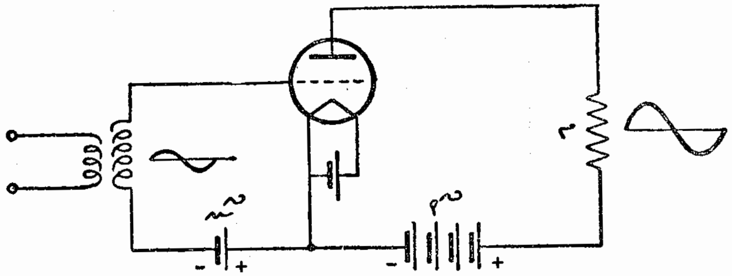
وهو الجواب المطلوب

فى المثال المتقدم ، لم نحسب الكسب فى القدرة . وطالما كان مرور التيار الشبكى مهملا فالقدرة المستنفذة فى دائرة الشبكة ضئيلة ، ويكون الكسب فى القدرة كبيراً (وقد يصل فى المثال المتقدم إلى بضع مئات الآلاف) . ويبين المثال فائدة المكبر ، فقد ضخمنا إشارة مقدارها ٢ فولط إلى ١٠ × ٢ = ٢٠ فولط . ويمكن توصيل مكبرات صمامية على التوالى ، فيغذى المكبر الثانى بإنتاج المكبر الأول ، وهلم جرًّا . وفى هذه الحالة يكون التكبير الكلى هو حاصل ضرب التكبير فى كل مرحلة . فمثلا قد تبلغ الإشارة الإذاعية التى يلتقطها هوائى الراديو نحو ١٠ ميكروفولط (١٠$^{-٥}$ فولط) . فباستعمال خمسة مكبرات من الطراز المذكور فى المثال المتقدم تتضخم الإشارة إلى ١ فولط ، وهى قيمة تكفى لتشغيل سماعة . والأنابيب الإلكترونية التى تصنع حالياً تتيح تكبيراً فى فرق الجهد يبلغ عدة مئات من المرات . ويكفى فى هذه الحالة استعمال صمامين أو ثلاثة لتضخيم إشارة الهوائى .

١٦ ــ ٧ تعليقات :

لقد عرضنا موضوع الالكترونيات من أبسط نواحيه . وقد نما الآن هذا العلم نموًّا هائلا وبرزت أهميته الفنية ، فأصبح عدد كبير من العمليات الصناعية يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالأنابيب الإلكترونية . ولسنا فى حاجة إلى تأكيد مكانته فى المواصلات التليفونية والإذاعية والتليفزيونية . وبالإضافة إلى التطبيقات الهندسية للأنابيب الإلكترونية ، فلها استعمالات لا حصر لها فى الأجهزة المستخدمة فى أبحاث الفيزياء . ويكفى أن نذكر ــ على سبيل المثال لا الحصر ــ أن عدادات جيجر ،

وقد وضع على الشبكة جهد سالب صغير لمنع مرور تيار شبكى أثناء القمة الموجبة



(شكل ١٦ — ٩)

للإشارة . ويبلغ جهد الأنود عادة ٢٠٠ أو ٣٠٠ فولط موجب ، فى حين يبلغ جهد الشبكة بضع فولطات سالبة . وقد استعمل فى الدائرة محول لإدخال الإشارة . وبسبب الجهد المتردد للإشارة يتأرجح صافى جهد الشبكة بطريقة متوالية ، فآناً يكون أقل سلبية وآونة يكون أكثر سلبية ، ولذا يكون التيار المار خلال المقاومة م تارة كبيراً وتارة صغيراً ، فيترتب على ذلك أن يرتفع ويهبط فرق الجهد عبر م (ف = ى م) متمشياً مع الإشارة التى تتلقاها الشبكة . ويمكننا أن نتخذ التكبير فى فرق الجهد (ت) كمقياس لأداء المكبر . ويعرف هذا المقدار على الوجه التالى :

$$\text{التكبير فى فرق الجهد (ت)} = \frac{\text{تغيرات فرق الجهد عبر المقاومة م}}{\text{تغيرات فرق جهد الشبكة}}$$

مثال : إشارة تيار متردد سعة الاهتزاز فيها ٢ فولط وضعت على شبكة صمام ثلاثى جهدها المتجه — ٣ فولط فوجد أن تيار الأنود يتغير من ٣ مللى أمبير إلى ٧ مللى أمبير إذا كانت دائرة الأنود تحتوى على مقاومة مقدارها ١٠٠٠٠ أوم . احسب تكبير فرق الجهد فى الصمام .

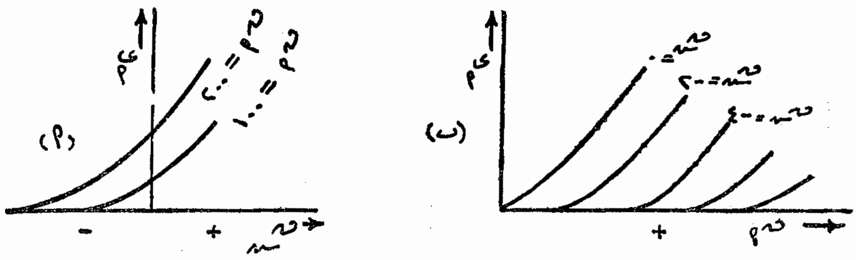
المعلوم : الإشارة = ٢ فولط ، $ق_{ش}$ = — ٣ فولط .

$ى_{١}$ = مللى أمبير ، $ى_{٢}$ = ٧ مللى أمبير ، م = ١٠٠٠٠ أوم

ت = ؟

الحل : بسبب الإشارة التى سعتها ٢ فولط يتأرجح جهد الشبكة من — ٣ + ٢

الأنود ليست ثابتة ، أى أن مقاومة الصمام متغيرة ، بخلاف المقاومة فى الموصلات



(شكل ١٦ — ٨)

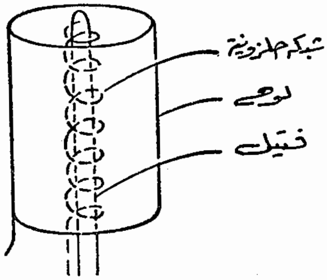
الفلزية . وعلى ذلك فقانون أوم (انظر بند١٣ — ٨) لا يسرى مفعوله على الأنابيب الإلكترونية .

١٦ — ٦ الصمام الثلاثى كمكبر :

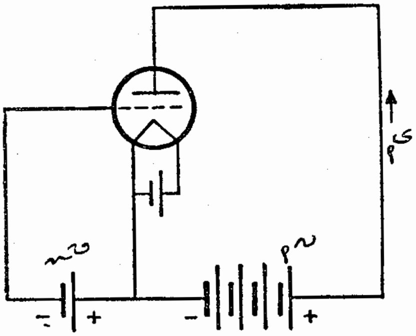
فى مستهل البند السابق عرفنا المكبر بدلالة التغيرات فى الجهد . وقد تكون هذه التغيرات مجرد تيار متردد بسيط (جيبى) ، أو تيار متردد معقد ، أو تغيرات فى تيار متجه (وتسمى هذه التغيرات الأخيرة عادة « بالنبضات ») . ويمكن أن تنشأ التغيرات الأولى من مولد ضعيف جداً ، مثل ملف يدور فى مجال الأرض المغنطيسى . أما التغيرات الثانية فيمكن أن تشمل تغيرات فرق الجهد فى ميكروفون أو تليفون تسقط عليه أمواج صوتية . أما الطراز الثالث من التغيرات فشائع فى الفيزياء النووية ، ويمكن أن يمثل استجابة عداد جيجر لجسيم ذرى أو نووى . وكافة هذه التغيرات فى فروق الجهد يضمها اصطلاح واحد هو لفظة إشارة . والنوعان الأولان إشارات لتيار متردد ، فى حين أن النوع الثالث إشارة لتيار نابض . ووظيفة المكبر العمل على زيادة سعة الاهتزازة فى هذه الإشارات .

ومقدرة الصمام الثلاثى على التكبير مردها إلى أن التغيرات الضئيلة فى جهد الشبكة تحدث تغيرات كبيرة فى تيار الأنود ، بسبب الموقع الاستراتيجى الهام للشبكة فى منطقة شحنة الحيز . وترى فى شكل ١٦ — ٩ دائرة مألوفة لمكبر صمامى .

قش تعطى فرق الجهد بين الشبكة والفتيل . (سنشير إلى كل الجهود منسوبة



(شكل١٦ – ٦)



(شكل ١٦ – ٧)

إلى جهد الفتيل. وعلى هذا يصبح أحد طرفى الفتيل نقطة توصيل مشتركة فى كل البطاريات) . فإذا كانت قش تكفى لتجعل الشبكة سالبة إلى درجة كافية . فلن تصل الإلكترونات إلى الأنود برغم جهده الموجب . فنى منطقة شحنة الحيز يلاشى مجال الشبكة مجال الأنود فى هذه الحالة . وإذا قللنا الجهد السالب للشبكة . تكون الغلبة لمجال الأنود ، ويظهر مجال جاذب صاف فيمر التيار إلى الأنود (ولكن لا إلى الشبكة بسبب جهدها السالب) . وفى النهاية ، يصبح مرور التيار من شحنة الحيز فى غاية اليسر والسهولة متى أصبحت الشبكة موجبة . ولكن فى هذه الحالة ، تستطيع الشبكة ، برغم اتساع ثقوبها وصغر مساحتها الفعالة ، أن تجمع بعض الإلكترونات ، فيمر تيار شبكى ، والمعتاد أن يوضع على الشبكة جهد سالب صغير (بضعة فولطات) لمنع مرور هذا التيار الشبكى .

ويمكننا تلخيص هذا الموضوع فى منحنيين يعرفان « بالمنحنيين المميزين » للصمام الثلاثى . ويرى هذان المنحنيان فى شكل ١٦ — ٨ . وكما فى حالة الصمام الثنائى ، يمثل تيار الأنود ىم على محور الصادات (محور المتغير غير المستقل) . وكل منحن فى شكل ١٦ — ٨ ا مرسوم لقيمة ثابتة من جهد الأنود . أما فى شكل ١٦ — ٨ ب ، فجهد الشبكة ثابت لجميع النقط التى تقع على منحن واحد . ويلاحظ فى شكل ١٦ — ٨ وكذلك فى شكل ١٦ — ٤ أن النسبة بين جهد الأنود وتيار

يستلزم منا بطارية ثقيلة ضخمة باهظة التكاليف . ولكننا نستطيع الاستعاضة عنها بمقوم متصل بمحول يرفع جهد المنبع المنزلى المتردد من ١١٥ فولط إلى ٣٠٠ أو ٤٠٠ فولط ، ثم يقوم الجهد بعد الرفع . وبعد استخلاص التيار المقوم من التأرجحات بوساطة مرشح مناسب ، يصبح لائقاً كبديل للبطارية .

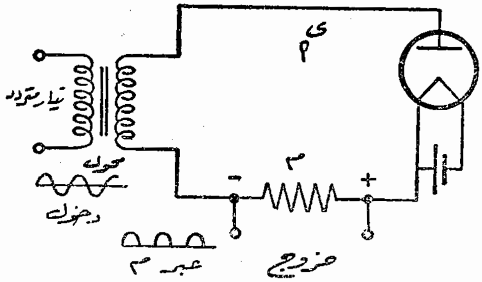
١٦ — ٥ الصمام الثلاثى :

فى عام ١٩٠٦ أضاف لى دى فورست « Lee De Forest » إلكترودا ثالثاً للصمام ، فنشأ عن ذلك كشف جليل الأثر فى الصناعة والحياة الاجتماعية ، بسبب التطبيقات المتعددة التى أصبحت متاحة بفضله . ويسمى هذا الالكترود الإضافى بالشبكة ، ويتكون من سلك منسوج بشكل شبكة ، يوضع بين الأنود وبين الفتيل . وتسمى الأنبوبة الإلكترونية المشتملة على فتيل ولوح وشبكة بالصمام الثلاثى . وليس من ريب فى أن أهم استعمال من الاستعمالات الكثيرة للصمام الثلاثى هو استعماله كمكبر ، وهو أداة تعطيها جهداً صغيراً متغيراً تحت قدرة منخفضة ، فتعطيك جهداً متغيراً يحاكيه شكلا ولكنه يمتاز عنه بأنه أكثر ضخامة وأعلى قدرة . (ويلاحظ أن المحول المعتاد ليس مكبراً ، إذ أن القدرة الخارجة لا تزيد فيه عن القدرة الداخلة) . وبداهة ، تأتى هذه الزيادة فى القدرة على حساب الإمدادات التى ترسلها البطاريات أو مصادر القدرة الأخرى التى يعمل بها الصمام .

ولنبحث الآن تأثير الشبكة على أهم معالم الأنبوبة الإلكترونية ، ونعنى بذلك شحنة الحيز ، إن المظهر الفذ للشبكة يكون فى موقعها بالنسبة لشحنة الحيز (شكل ١٦ — ٦) . وكما سبق أن أشرنا ، تعتبر شحنة الحيز العامل الجوهرى فى تحديد مرور التيار . وأى تغيير يحدث فى المجال الكهربى على مقربة منها يؤثر تأثيراً بليغاً على مقدارها ، وبالتالى على شدة تيار الأنود . ووظيفة الشبكة هى عمل مثل هذه التغييرات البسيطة فى شحنة الحيز ، وهو عمل يسهل على الشبكة أداؤه بفضل موقعها الاستراتيجى .

ويوضح شكل ١٦ — ٧ الدائرة الأساسية للصمام الثلاثى . ويلاحظ أن البطارية

الإلكترونية . ولشرح عمل المقوم ، افرض أن فرق جهد متردد قد وضع بين الأنود والفتيل . فحينئذ يمر تيار ى م فى دائرة الأنود إذا كان جهد الأنود أعلى من جهد الفتيل ، ولكن لا يمر أى تيار إذا كان جهد الأنود سالباً بالنسبة للفتيل . فالصمام الثنائى إذن ، يعمل فعلا كصمام يمر فيه التيار فى اتجاه



(شكل ١٦ — ٥)

واحد فقط . ومن أجل ذلك يسميه البريطانيون « صماماً » بدلا من أنبوبة إلكترونية ، كما آثر الأمريكيون أن يسموه . ويبين شكل ١٦ — ٥ دائرة يستعمل فيها الصمام الثنائى كمقوم . ومنها يرى أن التيار المتردد المراد تقويمه يجىء من الملف الثانوى لمحول (وهو ترتيب شائع وإن لم يكن ضرورياً). فإذا كان الأنود موجباً بالنسبة للفتيل يمر تيار فى الصمام من الأنود إلى الفتيل . وبعبارة أخرى ، تمر الإلكترونات من الفتيل إلى الأنود . وقد أدخلت المقاومة م لنحصل منها على فرق جهد متجه ف = ى م . ولما كان التيار يسرى دائماً من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض ، لهذا كان لزاماً أن تكون النهاية اليمنى للمقاومة م أعلى جهداً (+) من النهاية اليسرى (—) . وفى خلال نصف الدورة التى يكون فيها الأنود سالباً بالنسبة للفتيل ينقطع مرور التيار . وعليه ، ففرق الجهد الواقع على المقاومة م هو فرق جهد متجه ، ولو أنه ليس ثابتاً . ووظيفة الصمام تنحصر فى حذف النصف الأسفل من موجة التيار المتردد . ولتسوية التأرجحات فى التيار يمكن استعمال « مرشحات » كهربية (وهى دوائر خاصة لا يتسع المقام لشرحها) .

واستعمال الصمام الثنائى كمقوم يغنينا عن الحاجة إلى البطاريات فى الظروف العديدة التى يتيسر لنا فيها وجود التيار المتردد . ومثال ذلك ، يتطلب تشغيل جهاز الراديو المعتاد الحصول على مصدر تيار متجه يمدنا ببضع عشرات من الملى أمبير تحت ضغط عدة مئات من الفولط . وتأدية هذا الغرض بالبطاريات

التيار إلى حالة التشبع . وفى الجزء الأسفل من المنحنى تكون شحنة الحيز صفراً أو صغيرة . وحينما يأخذ المنحنى فى الاستواء بعد صعود تأخذ الشحنة الحيز فى النمو . وأخيراً فى الجزء المستوى من المنحنى يقال لتيار الأنود . إنه « محدد بشحنة الحيز » .

وزيادة فى إيضاح فعل شحنة الحيز سنشرح تجربة أخرى . دعنا فى هذه المرة نحفظ تيار الفتيل ثابتاً ونغير فرق الجهد بين الأنود والفتيل . وإذا مثلنا النتيجة بيانيًّا برسم تيار الأنود . ى، مقابل جهد الأنود ق، نحصل على المنحنى المبين فى شكل ١٦ — ٤ . ومنه نرى أنه عند ما يكون جهد الأنود صفراً فلن يكون هناك مجال كهربى لنقل الإلكترونات من شحنة الحيز ، ولذا يكون تيار الأنود صغيراً أو منعدماً . وبزيادة المجال الكهربى يزداد التيار ولكن الفتيل يكون قادراً على سد العجز الناتج من السحب من شحنة الحيز . هذا هو الوضع ابتداء من ق، = . إلى النقطة التى يأخذ المنحنى عندها فى الانثناء أفقيًّا . ومن هذه النقطة الأخيرة فصاعداً يعجز الانبعاث من الفتيل عن تعويض السحب من شحنة الحيز ، وأخيراً ، عندما يزداد المجال الكهربى كثيراً يزول رصيد الإلكترونات فى شحنة الحيز (تختفى هذه الشحنة) ولا يبقى أمام الأنود بعد أن نفد المخزون أمامه إلا أن يتزود مباشرة فى الإلكترونات المنطلقة بمعدل ثابت من الفتيل . ولهذا فمهما زاد جهده عن ذلك الحد فلن يزيد تياره . وعلى هذا الأساس يتخذ المنحنى الاتجاه الأفقى (أى التشبع) . ويقال للتيار فى هذه الحالة إنه « محدد بدرجة الحرارة » . وتستعمل معظم الأنابيب الإلكترونية عادة تحت ظرف شحنة مشبعة للحيز ، أى فى المنطقة الواقعة تحت المنعطف العلوى فى منحنى شكل ١٦ — ٤ . والقيمة المألوفة لتيار الأنود فى هذه الأنابيب تقع فى حدود الملى أمبيرات ، ولو أن التيار فى بعض الأنابيب الكبيرة قد يصل إلى بضعة أمبيرات .

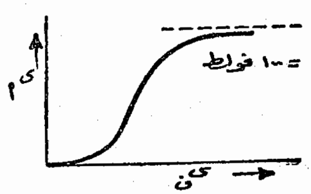
١٦ — ٤ الصمام الثنائى كمقوم :

يستعمل الصمام الثنائى أكثر ما يستعمل كمقوم ، أى كأداة لتحويل التيار المتردد إلى تيار متجه . وفى الواقع ، كان هذا الغرض أقدم استعمال للأنابيب

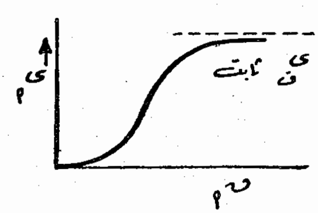
قد تحتوى الأنبوبة على غاز مخلخل بدلا من الفراغ . ولكى نأخذ فى اعتبارنا هذا الاحتمال ، فمن المفضل أن نستعمل الاصطلاح « أنبوبة إلكترونية » بدلا من الاصطلاح الأكثر تداولا وهو « أنبوبة فراغية » . واستيفاء لهذه الاصطلاحات نذكر أن دراسة الأنابيب الإلكترونية والدوائر المتعلقة بها تسمى بالإلكترونيات . وقد جرى العرف فى الإلكترونيات على رسم الأنابيب الإلكترونية رسماً رمزياً كالمبين فى شكل ١٦—٢ ب بدلا من الرسم التصويرى المبين فى شكل ١٦ — ٢ ا .

وإذا كان الأنود موجباً بالنسبة للفتيل ، فإن بعض الإلكترونات الموجودة فى شحنة الحيز تتحرك خلال الفراغ نحو الأنود . ويترتب على ذلك أن تنقص شحنة الحيز فيسمح ذلك لمزيد من الإلكترونات بالتبخر من الفتيل . وأمامنا الآن احتمالان : (١) فقد تبقى شحنة الحيز ثابتة المقدار تقريباً ، وذلك يجعل عملية استكمال العجز فيها متوازنة مع التيار . (٢) وقد تختفى شحنة الحيز إذا كان المجال الكهربى المستخدم مرتفعاً إلى درجة تكفى لنقل الكترونات أكثر مما يتيحه الفتيل. ولاستجلاء هاتين الحالتين النهائيتين دعنا ندرس دلائل التجربة التالية:

مع حفظ جهد الأنود قم ثابتاً (وليكن ١٠٠٠ فولط مثلا) دعنا نتتبع التيار الإلكترونى ىم المار فى الأنود عند زيادة تيار الفتيل ىن (وبالتالى عند رفع درجة حرارة الفتيل) . فى هذه الحالة سنحصل على النتيجة المبينة فى شكل ١٦—٣ .



(شكل ١٦ — ٣)



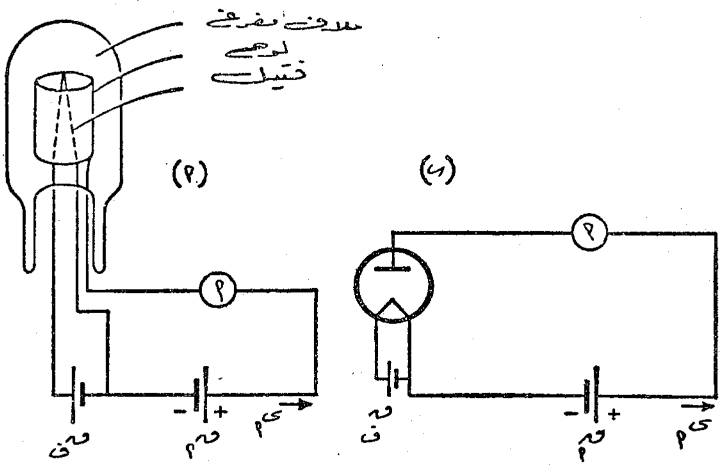
(شكل ١٦ — ٤)

فعندما يكون تيار الفتيل صغيراً ، تكون درجة حرارة الفتيل منخفضة . ويكون انبعاث الإلكترونات ضئيلا . وبرفع درجة حرارة الفتيل يزداد انبعاث الإلكترونات ويزداد تبعاً لذلك التيار الإلكترونى . وفى النهاية يستوى شكل المنحنى عند ما تكون درجة حرارة الفتيل كافية لإقامة التوازن فى شحنة الحيز ، ويصل

درجة حرارة السلك . (وفى كل مصباح كهربى له فتيل متوهج توجد شحنة فى الحيز حول الفتيل ، ولكن لا يستفاد منها فى شىء) .

١٦ — ٣ تأثير المجال الكهربى الخارجى — اللوح :

افرض أن مجالا كهربيًّا قد نشأ فى منطقة شحنة الحيز . إن تنفيذ ذلك يحدث عادة بإحاطة السلك وشحنة الحيز بصفيحة اسطوانية (شكل ١٦ — ٢ ا) . فإذا كان الفضاء بين السلك والاسطوانة مفرغاً إلى درجة عالية (حتى يتاح للإلكترونات أن تسير بدون عائق) وكان بين الأسطوانة والسلك فرق جهد فسوف تتحرك الإلكترونات فى المجال متى كان جهد الأسطوانة أعلى من جهد السلك . ويمكن قياس شدة هذا التيار الإلكترونى المتحرك فى الفراغ بوساطة مقياس للتيار (مللى أميتر عادة) متصل بالدائرة الخارجية . ويرى من شكل ١٦ — ٢ ا أن السلك



(شكل ١٦ — ٢)

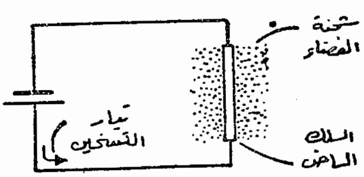
الباعث للإلكترونات منثن على نفسه (مزدوج) حتى يزداد الانبعاث ، وفى الوقت نفسه يتاح إخراج نهايتيه من قاعدة الأنبوبة . ويسمى ذلك السلك بالفتيل . أما الإسطوانة المحيطة به فتسمى باللوح أو الأنود . والمجموعة كلها إذا وضعت فى أنبوبة مفرغة من الهواء تسمى بالصمام الثنائى . (فى بعض الظروف الخاصة

ش$_{ن}$. فى درجة حرارة الغرفة ، فإن الانبعاث الثرميونى عند هذه الدرجة تافه غير محسوس . ولكن برفع درجة حرارة الفلز يمتد منحنى التوزيع السرعى ويزداد بسرعة عدد الإلكترونات التى تزيد طاقتها عن ش$_{ن}$. وفى درجات الحرارة البالغة الارتفاع يمكننا الحصول على تيارات تبلغ بضعة ملى أمبيرات بالانبعاث الحرارى من سلك قصير . والعملية شبيهة تماماً بعملية التبخير . وقد كان أديسون أول من اكتشف هذه الظاهرة عام ١٨٨٣ خلال تجاربه على المصابيح المتوهجة ، على أنها لم تبحث بحثاً جديًّا قبل القرن الحالى .

ودرجات الحرارة اللازمة لحدوث انبعاث ثرميونى مما نعتبره من الفلزات النقية تقع فى مرتبة ٢٠٠٠°م ، وعليه ، فالفلزات المناسبة لهذا الغرض هى تلك التى تكون نقط انصهارها عالية . (وجد أنه فى الإمكان تحضير مركبات فلزية يحدث منها انبعاث ثرميونى فى درجات حرارة منخفضة نوعاً) .

١٦ — ٢ شحنة الحيز :

إن أسهل طريقة للحصول على درجات الحرارة المرتفعة اللازمة للانبعاث الثرميونى هى إمرار تيار خلال سلك (الحرارة المتولدة هى ى^{٢}م ت) . وتتراكم الإلكترونات الهاربة من السلك الساخن فى المنطقة المحيطة به (شكل ١٦ — ١) ، فتتكون سحابة من الإلكترونات تسمى بشحنة الحيز أو بشحنة الفضاء . ويحدث توازن متى كان عدد الإلكترونات المرتدة إلى السلك بفعل التنافر الإلكتروستاتيكى مع شحنة الفضاء مساوياً لعدد الإلكترونات المنبعثة من السلك بفعل الحرارة . والإلكترون الذى يمتلك طاقة حرارية تكاد تكفى للتغلب على الشغل الثرميونى ، بمعنى أن طاقة حركته = ش$_{ن}$ يستطيع بالكاد أن يفلت من السلك . أما الإلكترون الذى تزيد طاقته عن ش$_{ن}$ فيخرج بفائض من طاقة الحركة وبالتالى يخرج بسرعة تكفى لدفعه مسافة خلال شحنة الحيز . ويتبع ذلك أن شحنة الحيز تتخذ شكل أسطوانة مشتركة مع السلك فى المحور ، ونصف قطرها يتوقف على



(شكل ١٦ — ١)

القيمة جداً . ولكى يكون انبعاث الإلكترونات محسوساً يتحتم أن يصل المجال الكهربى إلى نحو مليون فولط للسنتيمتر . ويمكن أن تنطلق الإلكترونات من الأجسام بعملية أخرى تنحصر فى تعريض السطح للضوء . وتسمى هذه العملية بالانبعاث الكهرضوئى ، وسيأتى الحديث عنه فى الفصل الحادى والعشرين . إلا أن أكثر الطرق شيوعا لإطلاق الإلكترونات من الأجسام تتلخص فى تسخينها إلى درجة عالية من الحرارة . وتسمى هذه العملية بالانبعاث الثرميونى . (ولعله كان من الأوفق أن نسميها الانبعاث الثرموالكترونى ، إذ أن الإلكترونات لا الأيونات هى التى يغلب انطلاقها) .

وجلى أنه لابد أن توجد قوة مقيدة تمنع رحيل الإلكترونات من الموصل ، ولا مندوحة فى بذل طاقة للتغلب على هذه القوة . ولا يمكننا أن نفهم تماماً كنه هذه القوة إلا بالدراسة التفصيلية للتركيب البلورى للفلزات ، الأمر الذى ليس لنا إلا أن نتحاشاه فى هذا الكتاب . على أننا نستطيع أن نفسر مظهراً من مظاهر هذه القوة .

تصور موصلا لايحمل شحنة ما . فإذا انتزعنا منه إلكترونا يتطلب منا ذلك بذل شغل لأننا بهذه العملية نفصل شحنة سالبة وهى الإلكترون من شحنة موجبة (هى ما يتبقى من الموصل عقب نزع الإلكترون) . ولكى نتغلب على قوة التجاذب هذه يلزمنا أن نبذل شغلا . وقد قيس مقدار الشغل اللازم لنزع وحدة الشحنة ، وبعبارة أخرى — فرق الجهد بين نقطة تكاد تقع داخل الفلز ونقطة تكاد تقع خارجه ، قيس فرق الجهد هذا لعدد كبير من الموصلات ، فوجد أنه من مرتبة بضعة فولطات . ونسمى فرق الجهد هذا بفرق الجهد الثرميونى ، كما سنسمى الشغل المناظر له بالشغل الثرميونى ش$_ن$. ومتى امتلك إلكترون قرب سطح الفلز هذه الكمية من الطاقة وهى ش$_ن$. فإنه يستطيع الإفلات من الموصل . وفى درجة حرارة الغرفة لا يوجد من الإلكترونات الحرة إلا عدد مهمل يقع فى ذيل منحنى التوزيع السرعى (والذيل هو الجزء المناظر للسرعات العالية) ويمتلك طاقة تصل إلى ش$_ن$. وبسبب ضآلة عدد الإلكترونات التى تمتلك طاقة تصل إلى

الفصل السادس عشر

الانبعاث الثرميونى وبعض الإلكترونيات

١٦ – ١ إفلات الإلكترونات من المعادن :

سبق أن ناقشنا الدور الذى تلعبه الإلكترونات الحرة فى التوصيل الفلزى . وسنلجأ الآن ثانية إلى نظرية الإلكترون الحر لكى نفسر بها هذه المرة ظاهرة الانبعاث الثرميونى .

فى حالة التوصيل الفلزى ، شبهنا سلوك الإلكترونات الحرة بسلوك جزيئات الغاز . ولدى تصادم الإلكترونات بذرات الفلز ترتد فى كافة الاتجاهات بسرعات مختلفة لها توزيع خاص تحكمه درجة الحرارة . وتتوقف « درجة حرارة » الإلكترونات على درجة حرارة الفلز بأجمعه . وطالما كان المجال الكهربى غير موجود داخل الفلز ، وبعبارة أخرى طالما كان الفلز غير معرض لمجال خارجى ، فلن يكون لحركة الإلكترونات اتجاه مفضل ، وإنما تكون الحركات عشوائية وتكون السرعات عالية جداً فى المتوسط . كما تكون الأغلبية العظمى للسرعات الإلكترونية واقعة فى نطاق السرعة التى تتميز بها درجة حرارة الفلز . ومتى تعرض الفلز لتأثير مجال كهربى ، تكتسب الإلكترونات ، بالإضافة إلى سرعاتها العشوائية ، سرعة صغيرة فى اتجاه المجال ينشأ عنها انسياق أو تيار على امتداد السلك . وعند تصادم الإلكترونات بالذرات ، تنتقل طاقة هذه الحركة الانسياقية من الإلكترونات إلى الذرات ، وترتفع درجة حرارة الفلز وفقاً لقانون جول (الحرارة المتولدة = $ى^2$ م ܩ).

ويهمنا فى هذا التلخيص عن التوصيل الإلكترونى أن نلاحظ أن الإلكترونات تمتلك حرية ، ولكن داخل حدود الفلز ، وأنه تحت الظروف المألوفة لا تستطيع الإلكترونات أن تبارح سطح الفلز . وتدعو هذه الحقيقة إلى إثارة السؤال التالى : ما هى العوامل التى تتيح للإلكترونات الانطلاق من سطح الفلز ؟ إن أحد هذه العوامل هو تعريض السطح لمجال كهربى خارجى عمودى كبير

لنز الذى يحمل اسمه . وتعطى الصفحات ٥١٣ — ٥١٩ نبذة عن بعض أعمال هنرى فى الحث الإلكترومغنطيسى .

Moulton, F. R. and Schifferes, J. J., "The Autobiography of Science." New York, Doubleday Doran and Co., 1945.

يحتوى على مقتطفات من مطبوعات فاراداى وهنرى عن القوة الدافعة الكهربية التأثيرية .

فى الملف إذا نظرنا إليه من ناحية المغنطيس ؟

٤ — وضعت حلقة من السلك بين قطبي مغنطيس كهربى من الطراز المبين فى شكل ١٤ — ١١ بحيث كان مستواها موازياً لوجهى القطبين . فإذا كان اتجاه التيار فى ملفات المغنطيس بحيث يجعل القطب العلوى قطباً شمالياً والقطب السفلى قطباً جنوبياً ، فأوجد اتجاه التيار التأثيرى فى الحلقة إذا نظرنا إليه من أعلى عند إمرار تيار فى ملفات المغنطيس .

٥ — يسحب الملف الابتدائى لمحول تياراً شدته ٣ أمبيرات تحت فرق جهد قدره ٥٠ فولطاً . احسب فرق جهد الملف الثانوى وتياره والقدرة المستهلكة ، علماً بأن نسبة اللفات فى المحول ، أى نسبة عدد لفات الملف الثانوى إلى عدد لفات الملف الابتدائى ، هى ٦ إلى ١ .

الجواب : ٣٠٠ فولط ، ٠,٥ أمبير ، ١٥٠ واط .

٦ — محطة كهربية معينة تولد ١٠٠ كيلواط تحت فرق جهد ٢٠٠ فولط ، ويراد نقل هذه القدرة الكهربية خلال خط أسلاك (كابل) مقاومته الكلية ٤ أوم . احسب كفاءة النقل ، أى النسبة بين القدرة الواصلة للمستهلك إلى القدرة المتولدة ، إذا استعمل بين المولد والخط محول نسبة اللفات فيه هى : (ا) ٥ إلى ١ ، (ب) ٥٠ إلى ١ .

الجواب : (ا) ٦٠ ٪ ، (ب) ٩٩,٦ ٪

مراجع مقترحة للاطلاع

Dampier, Sir William, "A History of Science", New York, The Macmillan Co., 1946.

فى صفحة ٢٤١ إلى صفحة ٢٤٥ عرض تاريخى للبحث الإلكترومغنطيسى .

Magie, W. F., "Source Book in Physics", New York, McGraw-Hill Book Co., 1935.

تقدم الصفحات ٤٧٣ — ٤٨٣ جانباً من أبحاث فارادى عن الحث الكهرومغنطيسى . وتحتوى الصفحات ٥١١ — ٥٦٣ على النص الأصلى لقانون

بطاقة كهربية فيحولها إلى طاقة ميكانيكية دورانية . ويعتبر الجلفانومتر (بند ١٤ ــ ١١) أول نواة للموتور ، إذ أن الفكرة الأساسية فى كل منهما هى أن مرور التيار فى موصل واقع فى مجال مغنطيسى ينشأ عنه قوة متعامدة على الموصل وعلى المجال . وكما فى حالة المولد ، المشكلة الفنية الوحيدة هى توصيل التيار من دائرة ثابتة إلى ملف يدور باستمرار . وحل هذه المشكلة فى حالة موتور التيار المتجه ينطبق تماماً على حلها فى حالة مولد التيار المتجه ، وبعبارة أخرى ، استعمال الحلقة العاكسة . والنقطة الجوهرية هى أن مولد التيار المتجه إذا زودناه بالتيار بدلا من أن نأخذ منه تياراً ، يصبح محرك تيار متجه . (هناك اعتبارات فى التصميم الهندسى تجعل ذلك الاستعمال المزدوج مسألة غير عملية) . ويزود الملف بالتيار عند ما يكون مستوى الملف موازياً للمجال . إذ أنه فى هذه الحالة يكون طول الملف متعامداً تماماً على المجال ه ، وتكون القوة نهاية عظمى . وشرح محرك التيار المتردد أكثر صعوبة من الناحية الفنية عن شرح محرك التيار المتجه . وبما أن هذا الشرح لن يضيف جديداً إلى الأسس الفيزيائية ، فسوف نضرب صفحاً عنه .

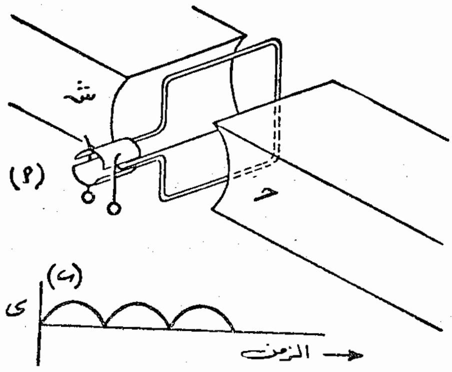
تمارين

(الأشكال التخطيطية والمناقشات المنطقية الواضحة ضرورية لشرح المسائل الخاصة بالقوة الدافعة الكهربية التأثيرية) .

١ ــ سلك موضوع فى مستوى أفقى بحيث يشير إلى اتجاهى الشمال والجنوب ، فإذا سقط خلال مجال مغنطيسى أفقى اتجاهه من الشرق إلى الغرب ، فأوجد اتجاه التيار التأثيرى فى السلك . أى طرف من طرفى السلك يكون موجباً ؟

٢ ــ تتحرك عربة نقل متجهة نحو الشمال ، فيقطع محور العجلات (الدنجل) مجالا مغنطيسيًّا يتجه رأسيًّا إلى أعلى . عين اتجاه القوة الدافعة الكهربية التأثيرية فى المحور .

٣ ــ يحيط ملف واسع من السلك بالقطب الجنوبى لقضيب مغنطيسى . فإذا سحب المغنطيس بسرعة بعيداً عن الملف فما هو اتجاه التيار التأثيرى



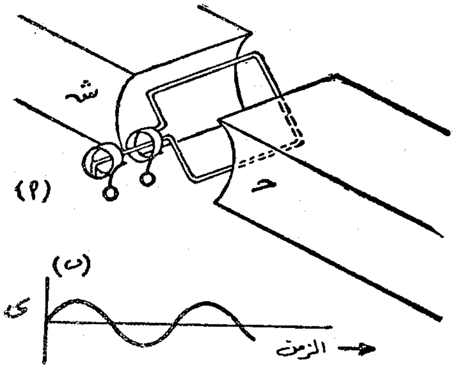
(شكل ١٥ – ١١)

١٥ — ١١) . وتعرف هذه الحلقة بحلقة التبديل أو الحلقة العاكسة . ويتصل كل قطاع من قطاعيها بأحد طرفى الملف وتثبت فرشتان بحيث تلامسان جانبين متقابلين فى الحلقة . وفى اللحظة التى يأخذ فيها التيار فى أحد جانبي الملف فى تغيير اتجاهه ينقطع اتصال ذلك الطرف بالفرشاة التى كان يلامسها وفى الوقت نفسه تتسلمه الفرشاة المقابلة . وبذلك يبقى تيار كل فرشاة سارياً فى الاتجاه نفسه . ومع أن استعمال الحلقة العاكسة يؤدى إلى الحصول على تيار متجه ، إلا أن ذلك التيار ليس ثابتاً ، كما نرى من شكل ١٥ — ١١ . ولتقليل هذا التغير يستعمل بدل الملف الواحد عدد من الملفات يتصل كل منها بزوج من قطاعات الحلقة العاكسة (وهى مكونة فى هذه الحالة من عدة أزواج من القطاعات المعزولة) وتهيأ الفرشتان بحيث يكون اتصالهما بكل ملف فى اللحظة التى يكون فيها تياره نهاية عظمى . ويترتب على ذلك وجود سلسلة من النهايات العظمى المتقاربة ، يختص كل ملف بواحدة منها ، وبذا لا يهبط التيار أبداً إلى الصفر ولكنه يتأرجح قليلا حول قيمة ثابتة . وتوجد وسائل أخرى لمحو الجانب الأكبر من هذة التغيرات ، مما يسمح بالحصول على تيار متجه يبلغ من الثبوت ما يبلغه تيار البطارية .

١٥ — ٧ موتور التيار المتجه :

كختام لهذا الفصل ينبغى الإشارة إلى الموتور أى المحرك الكهربى ، فمن المفهوم أن المولد يحتاج إلى عامل خارجى (كالتوربين المائى أو التوربين البخارى أو محرك الديزل أو إلخ) لتأدية الشغل الديناميكى فى إدارة الملف . ويتحول هذا الشغل بوساطة المولد إلى طاقة كهربية . أما المحرك الكهربى فيؤدى عكس هذه العملية تماماً ، إذ نمده

تستخدم فيها حلقتا انزلاق وتمدنا بتيار متردد ، والأخرى تستعمل فيها حلقة مشطورة (حلقة استبدال) وتزودنا بتيار متجة .



(شكل ١٥ — ١٠)

مولد التيار المتردد : هنا ينتهى أحد طرفى الملف بحلقة نحاسية . وينتهى الطرف الآخر بحلقة أخرى . وكلتا الحلقتين مثبتتان حول محور الدوران (شكل ١٥ — ١٠). وتكون حلقتا الانزلاق الاتصال الكهربى بتلامسهامع فرشاتين ثابتتين . وتصنع كل فرشاة عادة من الجرافيت ، وتشكل نهايتها بشكل الجزء الذى تلامسه من سطح الحلقة فتستقر فيه دون أن تعيقه عن الدوران . وتكون الفرشتان نهايتى التوصيل فى المولد . وتتخذ القوة الدافعة الكهربية الخارجة من المولد ، كما يتخذ التيار ، الصورة الموجية المبينة فى شكل ١٥ — ١٠ . ويتوقف تردد التيار المتردد على معدل دوران الملف . ويستعمل عادة عدد من الملفات بدلا من ملف واحد ، فيولد كل منها قوة دافعة كهربية يتغير اتجاهها عند كل دورة ، وفى الولايات المتحدة الأمريكية ، معظم التيارات المترددة تتبدل بمعدل ٦٠ دورة فى الثانية ، بمعنى أن القوة الدافعة الكهربية تمر خلال دورة كاملة من التغيرات فى $\frac{١}{٦٠}$ من الثانية . وإذا تذكرنا أن التأثير الحرارى للتيار ، وهو $ى^٢$ م ى ، يتوقف على مربع التيار وضح لنا أنه لا يتوقف على اتجاه مروره . ويحدث التيار المتردد التسخين نفسه الذى يحدثه التيار المباشر . ولهذا فالمكاوى الكهربية والشوايات والسخانات ومصابيح الإضاءة ، وغير ذلك كلها تعمل على التيار المتردد بنفس الصلاحية التى تعمل بها على التيار المتجه (ما لم تكن محتوية على أدوات الكتروميكانيكية كمنظمات التيار ، وقواطع التيار ونحو ذلك) .

مولد التيار المتجه : للحصول على تيار متجه من ملف دائر تستعمل بدل الحلقتين المنزلقتين حلقة واحدة مشطورة إلى نصفين يفصلهما عازل (شكل

على ق لا على ى) يستعمل فى زيادة التيار . ولا يجب أن يغرب عن البال أن القوى الدافعة والتيارات التى نتحدث عنها هنا كلها مترددة . أما التيار المستمر فلا يمكن إحداث عملية تحويل فيه .

وأخيراً ، لعله من المناسب أن نقول كلمة عن سبب الانتشار الواسع للتيار المتردد ، ولو أن هذا الموضوع بعيد نوعاً عن الفيزياء الذرية . إن نقل القدرة الكهربية خلال المسافات الطويلة يستلزم استعمال أسلاك لابد أن تكون لها مقاومة ما بسبب طولها الكبير . ويولد التيار المار فى هذه الموصلات حرارة مقدارها ى^{2} م ﮐ ، وكلما زاد التيار زادت الطاقة المتبددة بالحرارة ، ونقصت بذلك القدرة التى تصل إلى المستهلك . لهذا كان من المستحب نقل القدرة عند تيارات منخفضة . وبما أن القدرة = ق ى ، يتطلب ذلك منا أن نجعل ق كبيرة . وباستخدام محول رافع عند محطة توليد الكهرباء يمكن رفع الجهد من القيمة التى يتيحها المولد وهى غالباً فى حدود بضع مئات من الفولط) إلى قيمة عالية قد تصل إلى بضع مئات الآلا ف من الفولطات . وعند نهاية الخط الناقل للتيار (أى عند المستهلك) يستعمل محول خافض لتخفيض الجهد إلى قيمته المألوفة وهى ١١٠ أو ٢٢٠ فولط للاستعمال المنزلى وللمصانع . وهذا هو السبب فى شيوع استعمال التيار المتردد ، إذ يمكن بالاستعانة بالمحولات نقله بطريقة اقتصادية أكثر وفراً من نقل التيار المستمر .

١٥ ــ ٦ المولد الكهربى :

حينما كنا نناقش الكيفية التى يتحرك بها موصل خلال مجال مغنطيسى (بند ١٥ ــ ٤) كنا فى الواقع نشرح المولد الكهربى بطريقة غير مباشرة . وتحديداً للموضوع نعود فنكرر أنه عندما يدور ملف حول محور عمودى على مجال مغنطيسى تتولد فيه قوة دافعة كهربية مترددة . وتعتبر هذه الطريقة القاعدة المثلى فى تصميم المولدات . أما المسألة التى تحتاج بعد ذلك إلى تفصيل ، فهى الوسيلة التى يتم بها توصيل ذلك الملف الدائر إلى دائرة خارجية . وهناك طريقتان ، إحداهما

الأصفر (λ = ∝ ٦٠٠٠ $\mathring{A}$) أيتهما أشد حساسية الأذن أم العين ؟

الجواب : العين ، ولكن بمقدار ستة أضعاف فقط

٤ — البداية الكهرضوئية لجسم معين هى ٤,٢٥ إلكترون فولط . ما أقصى طول موجى للضوء الذى يولد فوتوإلكترونات؟

الجواب : ٢٩٠٠ $\mathring{A}$

٥ — وجد أن الجهد المؤخر الذى يكاد يلزم لإيقاف انبعاث الفوتوإلكترونات من خلية كهرضوئية معينة هو ٣ فولط . احسب طاقة الإلكترونات المنبعثة بوحدتى الإلكترون فولط والأرج

الجواب : ٣ إلكترون فولط ، ٤,٨ × ١٠$^{-١٢}$ أرج

٦ — وجد أن لمادة معينة بداية فوتوكهربية عند ضوء طوله الموجى ٥٠٠٠ $\mathring{A}$. احسب طاقة الحركة (بالإلكترون فولط) التى تصحب الإلكترونات المنبعثة من هذه المادة بضوء طوله الموجى ٣٠٠٠ $\mathring{A}$.

الجواب : ١,٦٥ إلكترون فولط

مراجع مقترحة للاطلاع

DARROW, K. K. "Introduction to Contemporary Physics" New York, D. Van Nostrand Co. 1926.

عرض شائق لموقف نظرية الكم فى عام ١٩٢٦ .

EDDINGTON, SIR ARTHUR, "The Nature of the Physical World", New York, The Macmillan Co., 1933.

يحوى الفصل التاسع عرضاً ممتعاً لنشوء نظرية الكم .

HOFFMANN, B. "The Strange Story of the Quantum", New York, Harper & Brothers, 1947.

كتاب جيد مكتوب للثقافة العامة وبرزت فيه الأوجه المعتادة لفكرة الكم .

JORDAN, P. "Physics of the 20th Century", New York, Philosophical Library, 1944.

يحوى الفصل الرابع منه عرضاً نقدياً غير فنى عن طبيعة نظرية الكم وكتب الكتاب أحد مؤسسى ميكانيكا الكم .

MILLIKAN, R. A. "Electrons (+ and —)", Chicago, University of Chicaog Press., 1947.

الفصل العاشر منه جدير بالقراءة ويبحث فى نظرية أينشتين الفوتوكهربية واختبارها بواضعها .

الفصل الثانى والعشرون

الأشعة السينية

٢٢ ـ ١ اكتشاف الأشعة السينية ـ رونتجن :

كانت أنبوبة التفريغ فى الغازات التى استخدمها ج . ج . طومسون للكشف عن الإلكترون ، هى هذا الجهاز الذى أدى إلى اكتشاف الأشعة السينية أيضا . وغالباً ما يوصف هذا الاكتشاف على أنه من الصدف التى تأتى عرضاً أثناء البحث التجريبى : أى أنه لم يأت نتيجة لتجربة صممت لتحقيق فروض معينة . فلقد كان « رونتجن » ، مكتشف هذه الأشعة ، يعمل فى معمله فى ألمانيا ، لدرس خواص أشعة الكاثود التى تتولد فى التفريغ الكهربى فى الغازات ، عندما وجد أن أحد الألواح الفوتوغرافية الذى كان موضوعاً بالقرب من أنبوبة التفريغ ، وملفوفا بإحكام فى ورق معتم لا ينفذ منه الضوء ، قد علته غشاوة ظهرت عند تحميضه . ولقد لاحظ كثير من الباحثين تلك الغشاوة فى الألواح الفوتوغرافية المحجوبة عن الضوء بهذه الطريقة ، وبقى الأمر كذلك ، حتى جاء « رونتجن » ودرس تلك « الحادثة » دراسة دقيقة منظمةفعلا .

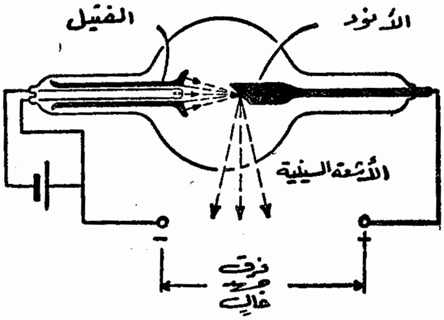
٢٢ ـ ٢ أنبوبة الأشعة السينية :

وجد «رونتجن» أنأشعة الكاثود ضرورية لإنتاج تلك الأشعةالتى تخترقالورق المعتم ،أضف إلى ذلك أن مصدر الإشعاع كان أنود أنبوبة التفريغ . وعندمااعترض مسار أشعة الكاثود فى طريقها إلىالأنود قطعة من المعدنوضعت بين الأنود والكاثود، أصبحذلك المعدن هومصدر تلكالأشعة المجهولة.عندئذ استنتج «رونتجن» أن الأشعة السينية تتولد عندما تصطدم الألكترونات السريعة (أشعة الكاثود) بهدف صلب ، ويستخدم فى أنبوبة الأشعة السينية الحديثة فتيل متوهج كمصدر للإلكترونات ، موضوع خلفه عاكس مقعر لتركيز أشعة الكاثود . وأنود ثقيل يميل بزاوية معينة على

اتجاه الإلكترونات الساقطة (شكل ٢٢ – ١) ، وتتولد عن كمية طاقة الحركة الكبيرة جداً التي تعطيها الإلكترونات للهدف عند اصطدامها به حرارة شديدة ، وعلى ذلك يكون الهدف عادة من مادة لا تنصهر بسهولة ، مثل : الموليبدنوم والتنجستن . أما الأهداف الأخرى ؛ فيجب أن تبرد بالماء ، ويمكن إجراء ذلك بعمل أنود مجوف يمر الماء فيه .

٢٢ – ٣ خصائص الأشعة السينية :

كانت خاصية الأشعة السينية التي أدت إلى اكتشافها هي إحداث غشاوة في اللوح الفوتوغرافي . وينتج هذا التأثير ، عن قدرة الأشعة على التأيين ، وهي ذات الخاصية المستخدمة في الكشف عن الأشعة . وبمرور الأشعة خلال المادة، تتحرر الإلكترونات من ذراتها ، محدثة مساراً من الأيونات على طوال حزمة الأشعة . فالأشعة السينية ، كما سنرى فيما بعد ، كمات عالية الطاقة (موجات كهرومغنطيسية) .



(شكل ٢٢ – ١)

ويمكن ربط التأين الذي تحدثه بالتأثير الكهروضوئي على مقياس ذري على أنه ، من ناحية أخرى ، تعمل طاقات كمات الأشعة السينية العظيمة على التقليل من احتمال حدوث التأثير الكهروضوئي ، والعمليات التأيينية الأخرى ، وتوفر للأشعة قدرة كبيرة على النفاذ . ونورد فيما يلي الطرق المختلفة الخاصة للكشف عن الأشعة السينية ، والعمليات التي تنبني عليها هذه الطرق .

الطريقة الفوتوغرافية :

إن العملية الأساسية في التصوير الفوتوغرافي ، هي تأين حبيبات هاليدات الفضة (هاليدات الفضة هي كلوريد أو بروميد الفضة) . وتتوقف العمليات التي تلي ذلك ، (مثل التحميض والتثبيت) على التفاعلات الكيميائية التي تؤثر في

الحبيبات المؤينة تأثيراً يختلف عن تأثيرها فى الحبيبات الأخرى ، والتأين فى التصوير الفوتوغرافى العادى ، عملية كهرضوئية مباشرة . أما فى التصوير بالأشعة السينية فيمكن أن ينتج التأين : إما عن الكمات بطريقة مباشرة وإما عن حوادث ثانوية . وواضح أن أى إشعاع مؤين يحدث صورة فوتوغرافية .

ولقد أوحت قدرة النفاذية للأشعة السينية ، وكذلك تأثيرها الفوتوغرافى ، إمكان استخدامها فى دراسة تركيبات العظام فى جسم الإنسان . فحيث إن الأشعة السينية ، تنفذ بسهولة فى اللحم ، أكثر منها فى العظام الأكبر كثافة ، فإنها تحدث صورة ظلية للعظام ، ولا يتطلب منا الاستخدام الشائع للأشعة السينية لهذا الغرض إسهاباً أكثر من ذلك .

تأين الغازات :

عندما تحدث الأشعة السينية تأيناً فى المواد الجامدة ، لا يمكن ، بالطبع ، جمع الأيونات بطريقة مباشرة ، حيث إنها لا يمكنها أن تتحرك فى المجال الكهربى ، على أنه يمكن جمع كل من الأيونات الموجبة والإلكترونات فى الغازات ، وينتج عن ذلك « تيار تأين » يتناسب مع شدة الأشعة السينية . ويمكن توضيح ذلك بطريقة بسيطة باستخدام مقياس كهربى (الكتروسكوب) (راجع الفقرة ١١ — ٨) مشحون ، إذ تنطبق ورقتاه عندما تتعرض لحزمة من الأشعة السينية فيعمل تيار الأيونات فى هذه الحالة على تعادل شحنة الورقتين . ويحمل المشتغلون فى الأماكن المعرضة للإشعاع مقاييس كهربية بسيطة خفيفة ، فتشحن هذه الأجهزة فى بداية النهار ، ثم تقاس الشحنة المتبقية عليها بعد مدة لتعيين الكمية الكلية للإشعاع الذى مر فى الجهاز (وحامله) .

الظاهرة الفلورية :

عندما تعمل أنبوبة التفريغ فى الغازات تحت فرق جهد عال يظهر وهج مائل إلى الخضرة حول الأنود . ومن العوامل التى تتسبب فى حدوث هذه الظاهرة الفلورية فعل الأشعة السينية فى الزجاج ، ويزداد التأثير بدرجة كبيرة ، باستخدام كبريتيد

الزنك ، أو بعض أكسيدات المعادن الأخرى وكبريتيداتها بدلاً من الزجاج ، وتفاصيل هذه العملية معقدة ، ولكن يمكننا القول بصفة عامة أنها تنتج عن قدرة الإلكترونات على إشعاع الضوء عندما تعود إلى أماكن استقرارها بعد أن تكون قد تحررت من الذرات (بالتأين) بفعل الأشعة السينية . والعملية شبيهة بما يحدث عندما تصطدم أشعة الكاثود بمادة متفلورة ، كما هى الحال فى أنبوبة التليفزيون التى تظهر عليها الصورة . وتستخدم هذه الحواجز المتزهرة فى التطبيقات العملية للأشعة السينية ، كجزء من المنظار الفلورى العادى .

٢٢ — ٤ قوة النفاذية للأشعة السينية :

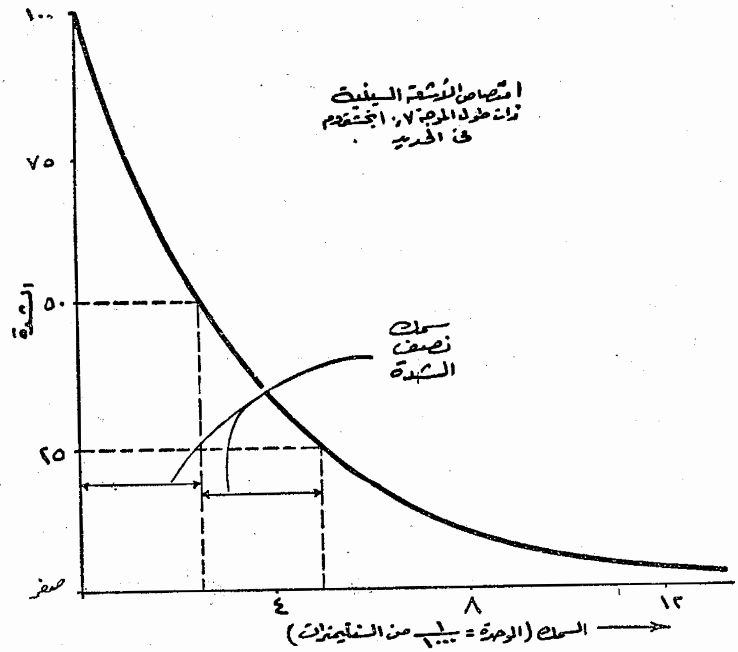
قد سبق أن ذكرنا أن الأشعة السينية تضعف بمرورها خلال الأوساط المادية ، ويتناسب التناقص فى شدتها مع التأين الذى تحدثه ، وإذا أردنا التعبير عن ذلك بنظرية الكم ، يمكننا القول : إن حزمة الأشعة السينية عبارة عن مجموعة من الكمات ، وعندما تحدث الكمة عملية تأين تختفى وتفقدها الحزمة ، أضف إلى ذلك أن بعض الكمات تتشتت من الحزمة إما تشتتا مرنا (بدون فقد فى الطاقة) وإما غير مرن (راجع الفقرة ٢٤ — ٢) ، وتسهم كل من هاتين العمليتين فى امتصاص الحزمة أثناء مرورها خلال الأوساط المادية . ويتحكم فى كل من العمليتين عامل الصدفة ، أو احتمال حدوثهما فى طول مسار معين داخل الوسط المادى .

وإذا كانت جميع الكمات متساوية فى التردد ، فواضح أن تلك العمليات تتكرر بتغير فى عدد الكمات فقط ، فى الطبقات المتتابعة من المادة . فهناك ، مثلا ، سمك معين يتناقص فيه عدد الكمات إلى النصف ، ويتناقص عددها فى ضعف هذا السمك إلى $\frac{١}{٢} \times \frac{١}{٢} = \frac{١}{٤}$ من قيمته الأصلية وهلم جرا . ولما كانت شدة الحزمة تتناسب مع عدد كماتها ، فإن الشدة تضمحل طبقا لهذه القاعدة عندما تمر الحزمة فى الوسط المادى (انظر شكل ٢٢ — ٢) ، وليكن واضحاً أنه لا يوجد سمك ، مهما بلغت قيمته ، ويكفى لإنقاص الشدة إلى الصفر تماما .

٢٢ — ٥ الطبيعة الموجية للأشعة السينية :

قد شاهدنا خصائص عديدة للأشعة السينية ، ولكننا لم نبين — حتى الآن —

كيف توصلنا إلى إثبات أنها كمات . ومن السهل توضيح أنها خالية من الشحنة ، إذ أن حركتها لا تتأثر بالمجال الكهربى أو المغنطيسى (وهذا يستبعد فكرة أن الأشعة السينية قد تكون أشعة كاثودية منعكسة) . وتوحى قوة نفاذيتها العالية باحتمال كونها موجة شبيهة بموجة الضوء ، ولكن ذات طاقة أكبر . والاختبار الحاسم لطبيعتها الموجية هو قدرتها على تكوين تداخل إنشائى إتلافى (راجع الباب العاشر) على أنه ، لا يمكننا الحصول على نموذج الحيود المتوقع ، لا من تجربة الفتحة المزدوجة

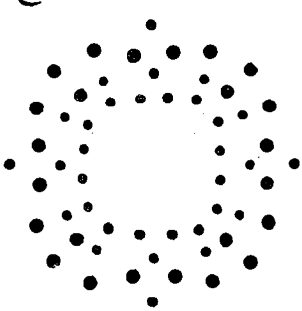


(شكل ٢٢ — ٢)

العادية (تجربة يونج) ولا من محزوز الحيود . ولكن « فون لاو » تغلب على الصعوبة عام ١٩١٢ عندما هداه تفكيره إلى أنه لو كانت الأشعة السينية موجات حقيقية فإن الفشل فى الحصول على نموذج تداخل باستخدام محزوز الحيود يجب أن يعزى مرجعه إلى صغر الحيود فى النموذج : أى أن زاوية الحيود كانت صغيرة جداً لدرجة أنها لم تفصل الأشعة الحائدة عن الصورة المباشرة غير الحائدة . فمعادلة محزوز الحيود (المعادلة ١٠ — ٢) هى :

$$ن\lambda = ف\,\frac{س}{ص}$$

حيث س ، هي بعد الصورة الحائدة (هدبة الحيود) عن الصورة المباشرة ، وهي مدى امتداد نموذج الحيود . وحيث إن مسافات المحزوز ف ، ومرتبة الهدبة ن ثابتتان للمحزوز الواحد، فإن صغر س لابد وأن يكون راجعاً إلى صغر طول الموجة λ . ولإمكان الحصول على هدب لصورة الحيود تصلح للمشاهدة ، يجب أن يعوض صغر طول الموجة باستخدام محزوز ذى مسافات (ف) أصغر . وقد اهتدى « لاو » إلى فكرة صائبة : وهى أن البلورات يمكن أن تصلح كمحزوزات مناسبة ، فالذرات فى البلورات مرتبة على مسافات منتظمة وصغيرة جداً . ولقد كانت هناك شواهد — وقتئذ — على أن قيمة ف فى أغلب البلورات فى حدود $١٠^{-٨}$ سم . فى حين أن المسافات التى تفصل الخطوط فى أدق المحزوزات التى صنعها الإنسان ، لم تقل عن $١٠^{-٤}$ سم . ولما كانت مراكز الحيود فى البلورات هى نقط (الذرات) وليست خطوطا ، فعلينا أن نتوقع نموذج حيود مكون من نقط بدلاً من خطوط . فإذا كانت البلورة تامة الانتظام : أى كانت جميع المسافات فى البلورة متساوية فى جميع أنحائها ، يظهر النموذج كمجموعة من النقط هى صور التداخل لمصدر نقطى (شكل ٢٢ — ٣) وتسمى هذه النماذج « نماذج لاو » وتفسير مدلولاتها يكون فى الغالب معقداً، خصوصاً إذا كانت البلورة غير تامة الانتظام . على أنه اتضح من قياس زوايا الحيود ، أن الأشعة السينية العادية موجات يقع طولها فى حدود وحدة انجستروم واحدة ($١٠^{-٨}$ سم) . (طول موجة الضوء المنظور يقع فى حدود ٥٠٠٠ انجستروم) .

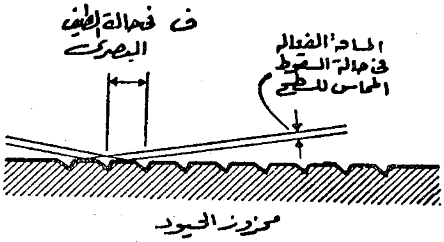


(شكل ٢٢ — ٣)

ولقد بينت التجارب التى أعقبت ذلك بشكل حاسم أن للأشعة السينية خواص الضوء المنظور (كالتداخل والاستقطاب إلخ) ، وتختلف عن كمات الضوء فى طول الموجة فقط . ويجدر بنا ، فى هذه المناسبة ، أن نذكر أن نجاح تجربة « فون

لاو » أكد وجهة النظر القائمة بأن البلورة عبارة عن مجموعة منتظمة ثابتة من مصفوفات الذرات ، وأنها تحافظ على هذا النظام حتى فى البلورات الكبيرة .

وما أن اتضح أن الأشعة السينية عبارة عن موجات ذات طول موجى صغير حتى تمكن « ا . ه . كومتن » من أن يبين أنه من الممكن الحصول على نموذج حيود محسوس للأشعة السينية من محزوز الحيود الضوئى العادى إذا سقطت الأشعة فى اتجاه المماس للمحزوز . فالمسافة الفعالة بين خطوط المحزوز تكون فى الاتجاه القريب لسطحه أصغر كثيراً منها إذا ما شوهدت فى الاتجاه العمودى على السطح (شكل ٢٢ — ٤) ، وعلى ذلك ، فإذا أسقطت الأشعة بحيث تكون على وشك التماس مع سطح المحزوز ، أمكن مشاهدة نموذج يشبه الطيف الخطى الضوئى العادى .



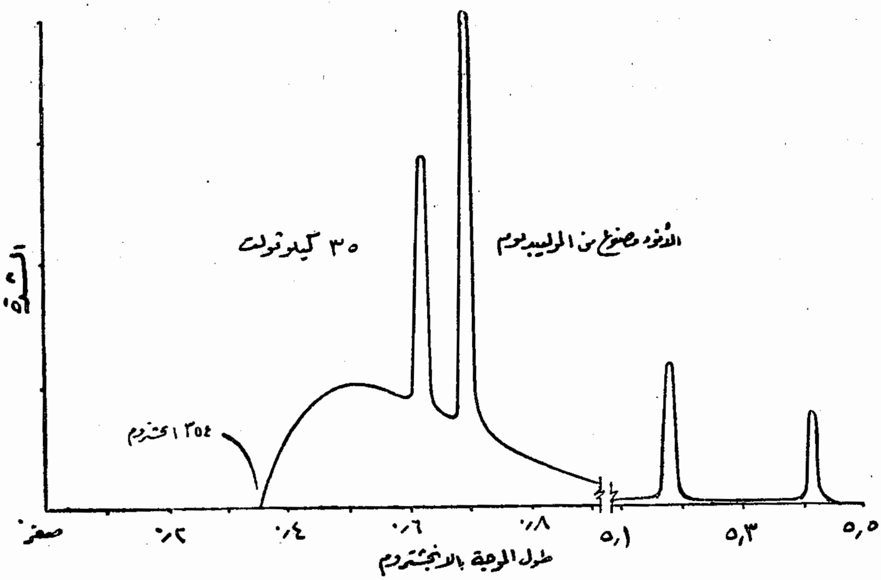
(شكل ٢٢ — ٤)

٢٢ — ٦ طيف الأشعة السينية :

إذا حللنا حزمة الأشعة السينية الصادرة من أنبوبة مثل تلك المبينة فى شكل ٢٢ — ١ إلى مركباتها من الموجات ذات الأطوال المختلفة نحصل على توزيع كالمبين فى ٢٢ — ٥ . وهو يتكون من مركبتين : إشعاع متصل تقع نهايته عند نقطة فى منطقة التردد العالى ، ومركب عليه طيف خطى ، ولقد وجد أن الطيف الخطى مميز للمادة التى تولدت منها الأشعة السينية : أى الأنود ، فى حين أن شكل الطيف المستمر وموقعه يتوقفان فقط ، على طاقة إلكترونات التى تصطدم بالأنود .

وواضح طبقاً لنظرية الكم ، أن نهاية الطيف المستمر فى منطقة التردد العالى (التردد النهائى) تقابل تردد تلك الكمات التى تلقت طاقة الإلكترون بأجمعها ، وأنه لا يمكن الحصول على تردد أعلى من ذلك . وهذا يعنى أن :

$$ط = ﺣ س = vh \qquad (٢٢ — ١)$$



(شكل ٢٢ – ٥)

حيث حـ هى فرق الجهد بين أنود الأنبوبة وكاثودها ، س هى شحنة الإلكترون :

مثال : ما هو التردد النهائى الذى يقابل فرق جهد حـ = ٣٥٠٠٠ فولت (انظر شكل ٢٢ – ٥) ؟

$$\gamma = \frac{\text{حـ س}}{\lambda} = \frac{٣٥٠٠٠}{٣٠٠} \times \frac{٤,٨٠ \times ١٠^{-١٠}}{٦,٦٢ \times ١٠^{-٢٧}} = ٨,٤٦ \times ١٠^{١٨} \text{ فى الثانية}$$

حيث ν_{μ}ع تدل على النهاية العظمى للتردد وعلى ذلك يكون طول الموجة النهائى :

$$\lambda = \frac{\text{ع}}{\nu}$$

حيث $\nu_{\delta\lambda}$ تدل على النهاية الصغرى للطول الموجى

$$= \frac{٣,٠٠ \times ١٠^{١٠}}{٨,٤٦ \times ١٠^{١٨}} = ٠,٣٥٤ \text{ أنجستروم}$$

وحيث إنه يمكن قياس كل من λ ، حـ قياساً دقيقاً . فإن مثل هذه التجارب

h

تعطينا قيمة مضبوطة للنسبة س ،

وسوف لا تشغلنا تفاصيل شكل الطيف المستمر فى هذا المقام ، اللهم إلا أنه

عند النهاية تتلقى الكمات طاقة تقل عن الطاقة ح س ، ويرجع ذلك إلى فقد الإلكترونات لبعض طاقتها عندما تنفذ فى الأنود .

ولقد حظى الطيف الخطى باهتمام عظيم ، وبخاصة منذ تطور نظرية الكم ، وسوف نرى فيما بعد أنه ينشأ بالكيفية نفسها ، التى يحدث بها الطيف الضوئى ، ويقابل تغيرات فى الطاقة الداخلية للذرات (راجع الفقرة ٢٣ — ٩) .

تمارين

١ — ما هو الجزء من الأشعة السينية الذى ينفذ من ١٠ سم من وسط ماص ، إذا كانت شدتها تنقص إلى النصف بمروها فى ٢ سم من الوسط نفسه ؟

الجواب : ٣,١ ٪

٢ — احسب تردد الأشعة السينية ذات الطول الموجى ٥ أنجستروم .

الجواب : ٦ × ١٠^{١٧} ذبذبة فى الثانية

٣ — احسب طاقة الأشعة السينية ذات الطول الموجى ، أنجستروم بالأرج وبالإلكترون فولط

الجواب : ٣,٩٧ × ١٠$^{-٩}$ أرج ، ٢٤٨٠ إ ف

٤ — إذا كان فرق الجهد بين طرفى أنبوبة الأشعة السينية ١٠٠٠٠٠ فولط ، فاحسب أقصى طول موجى للأشعة السينية التى تتولد .

الجواب ١٢٤, أنجستروم

٥ — إذا علمت أنه يمكن للبيتاترون (راجع الفقرة ٢٨ — ٦) أن ينتج إلكترونات ذات طاقة ١٠٠ مليون إلكترون فولط ، فاحسب أقصر طول موجى للأشعة السينية ، التى يمكن أن تتولد عن هذه الإلكترونات ، واحسب ترددها كذلك .

الجواب : ٠,٠٠٠١٢ أنجستروم ، ٢,٥ × ١٠^{٢٢} ذبذبة / ث

مراجع مقترحة للاطلاع :

JAUNCEY, G. E. M. "The Birth and Early Infancy of X rays" American Journal of Physics, vol. 13 p.p. 362-79, 1945.

قصة أشعة رونتجن وما صاحب اكتشافها من قصص شعبية غريبة .

MOULTON, F. R. & SCHIFFERES, J. J. "The Auto biography of Science" New York. Doubleday Doran & Co. 1945.

تحوى الصفحات من ٤٨٤ إلى ٤٩٠ ما كتبه « رونتجن » بنفسه عن اكتشافه للأشعة السينية .

الفصل الثالث والعشرون

نظرية بوهر الكمية للذرة

٢٣ ـ ١ النماذج الذرية والميكانيكا الذرية :

كان تطور فكرة ذرية المادة ، فى القرن التاسع عشر ، يسير جنبا إلى جنب مع مشاهدات العمليات الكيموية والسلوك الحرارى للمادة ، وبخاصة الغازات . ولقد نشأت الذرة ، ككائن حقيقى فى المادة ، وظلت تلعب ذلك الدور حتى القرن الحالى . ووصفت الذرات بالحركة (نظرية الحركة) وأعطيت لها كتلة (الكتل الذرية) وحجم وقابلية للاتحاد الكيموى (التكافؤ) ، ولكن لم يعرف لها أى تركيب أو ميكانيكا داخلية حتى عام ١٩١١ . وكانت الصورة المأخوذة عنها ، قبل ذلك الوقت ، أنها المركبات الأولية للمادة ، وأنها ذات خواص عديدة ، ولكن لم تفسر هذه الخواص طبقا لأى نظرية ذرية . ولقد سلكت الذرات سلوكها هذا ، لأنها أعطيت هذه الصفة بمعرفة الإنسان أثناء بحثه لوضع الظواهر الطبيعية طبقاً لنموذج مجسم . ولم يكن تلمس الافتراضات والنظريات قد تخطى بعد ، مرحلة الصورة والمادة الذرية إلى الصورة الأوضح لداخل الذرة .

ولقد بدأت هذه الصورة الواضحة تظهر بعد بدء القرن الحالى بقليل ، نتيجة لاكتشاف الكثير من العمليات الذرية الجديدة . فقد كشف التفريغ فى الغازات عن الطبيعة الكهربية لمكونات الذرة . وتطلبت تجارب طومسن على أشعة الكاثود ، ودراسات الأشعة الموجبة أن تكون الإلكترونات من مكونات الذرة . وأوضحت ظاهرة الكهروضوئية التفاعل بين الذرة والضوء ، كما بين اكتشاف الأشعة السينية بوضوح أصلها الذرى . فناءت النماذج الذرية الغامضة فى ذلك الوقت بالحمل الذى ألقته عليها الشواهد الجديدة ، التى تجمعت فى سنين قليلة ، وتطلبت تركيبا أكثر تفصيلا .

ولقد كان هناك ، بالطبع ، عدة محاولات لوضع افتراضات ونظريات طوال

هذه الفترة ، للتوفيق بين العمليات الذرية وبين نموذج ذرى . ولأغلب هذه المحاولات أهمية تاريخية فقط ، ولا يهمنا من أمرها شيء هنا ، على أن « أرنست رذرفورد » اقترح فى عام ١٩١١ نموذجاً نوويًّا للذرة ، وجاء بعده بوقت قصير ، « نيلز بوهر » واستخدم هذا النموذج لتفسير طبيعة الطيف الخطى . ولقد كان للنجاح الذى لاقته هذه المحاولات أثر مباشر عميق الغور . ولم تمض سنوات قليلة حتى كانت النظرية الجديدة قد طبقت لتفسير التكافؤ الكيميائى وطيف الأشعة السينية ، والعلاقة العامة بين الضوء والعمليات الذرية . ولم تكن النظرية كاملة فى أول الأمر ولزم تعديلها بنظرية الكم الجديدة خاصة ، وبذلك حققت تنبؤاتها وصححت عيوبها . والآن ، يعتبر التقدم من نموذج « رذرفورد » الذرى إلى كمال النظرية الحالية ، من الوجهة التاريخية ، قصة شائقة ومثيرة .

٢٣ ـ ٢ نموذج الذرة النووى :

أجريت حتى عام ١٩١١ أنواع عديدة من التجارب ، لم يتيسر تفسيرها إلا بالاستعانة بنماذج ذرية مفصلة ـ وكان أحد تلك النماذج من اقتراح « ج . ج . طومسن » لتفسير تشتت الأشعة السينية فى المادة . لقد كانت ذرة « طومسن » عبارة عن توزيع متصل لمادة ذات أبعاد ذرية تحمل شحنات كهربية . ويمكن تشبيهها ببحر من الكهربية الموجبة ، يحمل بين طياته الكترونات سالبة ولكن نموذج « رذرفورد » كان بعيداً كل البعد عن ذلك ، فذرة « رذرفورد » تتكون من قلب موجب صغير جدًّا (بضع أجزاء من عشرة آلاف من حجم الذرة) ، تحيط به سحابة منتشرة من الإلكترونات . ولقد توصل « رذرفورد » إلى هذا النموذج من دراسته لتشتت جسيمات ألفا .

وسوف نعالج فى الباب الخامس والعشرين ، العمليات الإشعاعية التى يتسبب عنها انبعاث جسيم ألفا ، ولكن يكفينا « فى الوقت الحاضر » أن نذكر أن هناك عناصر معينة تبعث من تلقاء نفسها جسيمات موجبة الشحنة (تحمل شحنة تساوى + ٢ ش) ، كتلة كل منها ٤ وحدات كتلة ذرية ، وتبلغ طاقة كل منها عدة

ملايين من الإلكترون فولط . وتسمى هذه الجسيمات « بجسيمات ألفا » . ولقد وجد أن الحزمة من هذه القذائف السريعة تتفرق أو تتشتت بمرورها فى الأغشية المعدنية الرقيقة . وكان واضحا أن هذه الجسيمات العالية الطاقة ، تنفذ خلال ذرات الغشاء المعدنى ، ويحدث التشتت نتيجة للقوى الكهربية بين جسيمات ألفا ومركبات الذرة . وكان الأمر البالغ الأهمية هو ضرورة تفسير حدوث التشتت بزوايا كبيرة ، تلك الحوادث التى كانت نادرة العدد ، ولكنها حقيقة ماثلة يمكن قياسها .

وإذا طبقنا نموذج « طومسن » للذرة على هذه الحالة ، نجد أن جسيم ألفا لا ينحرف جانبا بفعل سحابة المادة الكهربية المنتشرة فى الذرة ، ولكنه ينفذ خلال هذا التركيب ، ويعانى عدداً من الدفعات الصغيرة من المادة الموجبة والسالبة التكهرب . وقد تعمل تلك التصادمات على تفريق حزمة جسيمات ألفا ، ولكنها لا تتسبب عمليا فى أى تغيير فى الاتجاه يزيد على درجات قليلة . ولقد حقق «رذرفورد» أن ذلك التفسير لا يتفق مع التجربة ، واقترح نموذجا نوويًّا للذرة يمكنه إحداث تشتت بزوايا كبيرة ، نظراً لوجود القلب النووى الثقيل العالى الشحنة . أضف إلى ذلك ، أن حساباته التى أجراها فى عام ١٩١١ ، اتفقت كميًّا مع التشتت المشاهد بالتجربة لجميع الزوايا ، وبينت بصورة قاطعة أن فكرة النموذج النووى للذرة فكرة صائبة .

وبإدخال بعض الاستنتاجات القليلة الحديثة نجد أن نموذج « رذرفورد » النووى للذرة ينبنى على ما يأتى :

١ — تتركز كتلة الذرة جميعها تقريباً فى جسيم يقع قطره فى حدود ١٠^-١٢^ سم ، وهذا الجسيم هو قلب الذرة أو نواتها .

٢ — تحمل هذه النواة شحنة موجبة ، ويساوى عدد وحدات الشحنة التى عليها « العدد الذرى » للذرة (وحدة الشحنة تساوى عدديا شحنة الإلكترون) . ولقد كان ذلك حدسا صائباً ، إذ أن تجارب التشتت لم تعط فى ذلك الوقت إلا قيما تقريبية فقط لشحنة النوى المشتتة ، على أن تجارب التشتت التى أجريت ، فيما بعد ، على الأغشية المعدنية المختلفة أكدت هذا الحدس ، وبمراعاة الحقيقة القائمة بأن الذرة متعادلة كهربيا ، وأنها تحتوى على إلكترونات سالبة بالإضافة إلى نواة

موجبة ، فإن النموذج يعطينا ما يأتى :

٣ ــ تنتشر الإلكترونات خلال منطقة ذات أبعاد ذرية (١٠^-٨ سم) حول النواة . وعدد الإلكترونات يساوى العدد الذرى .

ولقد سبق أن أعطينا صورة لهذا النموذج فى شكل ١١ ــ ٣ .

٢٣ ــ ٣ ذرة « بوهر » وقياس الأطياف :

عنى نموذج « رذرفورد » النووى للذرة بتوزيع الكتلة والشحنة فى الذرة فقط ، ولكنه لم يعط تفسيراً للعمليات الذرية الداخلية . فلم يشر ، مثلا ، إلى سبب استقرار الذرة ، ولا إلى السبب فى عدم انهيارها نتيجة التجاذب الكهربى بين الإلكترونات السالبة والنواة الموجبة ، أضف إلى ذلك ، أنه لم يتنبأ بالعمليات الذرية المختلفة المعروفة من ميكانيكا التركيب . ولقد كانت أولى العمليات الداخلية ، التى نجحت النظرية الذرية فى تفسيرها ، هى انبعاث الطيف الخطى وامتصاصه من الذرات ذات الإلكترون الواحد (الأيدروجين ، الهيليوم أحادى التأين ، الليثيوم الثنائى التأين ، إلخ) ، فبدأت هذه العلاقة بين النظرية الذرية وقياس الأطياف بمعرفة « بوهر » وظلت منذ ذلك الحين من أنفع العلاقات .

لم يكن « بوهر » يعمل فى مجال لم يسبق طرقه بالمرة عندما قدم نظريته عن الأطياف . فلقد سبق أن تجمع عدد كبير من البيانات المسجلة والعلاقات المستمدة من التجربة فى قياس الأطياف ، ابتداء من منتصف القرن التاسع عشر ، عندما بدأ تطور المطياف الحديث . فكانت أطوال موجات الخطوط الطيفية من المصادر المعروفة ، مرتبة فى جداول ، وعرفت أنواع مختلفة من الأطياف ، وكذلك قواعد مبنية على التجربة للتوفيق بين مواقع الخطوط فى بعض الأطياف البسيطة . على أنه لم تكن هناك أية نظرية للطيف قبل عمل « بوهر » فى عام ١٩١٣ ، وكل ما كان هناك عبارة عن مجموعة من البيانات الطيفية والقواعد لتبويبها .

وخلاصة الأمر ، أن « بوهر » واجه مشكلة تفسير استقرار الذرات ، المعروف باستخدام نموذج يتضمن إمكان حدوث عمليات داخلية تتفق مع انبعاث الضوء

من الذرات وامتصاصه فيها . ولقد سبق أن رأينا أن الديناميكا الكهربية فشلت فى تفسير هذه الحقائق ، بل إنها فى الحقيقة ، تتنبأ بعدم استقرار التركيب المكون من جسيمات مشحونة . فتجنب « بوهر » عدم الاستقرار هذا ، بإنكار صحة تطبيق الديناميكا الكهربية الكلاسيكية بالتفصيل فى حالة الذرة ، واقترح مجموعة من الفروض الديناميكية للذرة . وجاءت الحسابات التى أجراها متفقة بصورة رائعة مع الحقائق الطيفية ، وزودتنا بنظرية ، أمكن بها تفسير القياسات الطيفية التى رصدت بعد ذلك .

ونجاح نظرية « بوهر » هو ، بطبيعة الحال ، نجاح محدود المعالم ، ولكن لا يغيب عن بالنا ، أنه على الرغم من عدم قبول تفاصيل هذه النظرية ونموذجها فى الوقت الحاضر ، إلا أن « بوهر » قد استحدث آراء معينة عامة فى قوانين السلوك الذرى ، قدر لها أن تعيش وتصبح أساساً لجميع نظريات الذرة . أضف إلى ذلك أن « بوهر » رسم لنا « صورة » للذرة (وعملياتها) ، لم يحدث أن أدخلت عليها تحسينات ، ومن المحتمل ألا يحدث ذلك لسبب بسيط ، وهو أن النظرية التى صححت نظرية « بوهر » ، ووسعت نطاقها ، بل وحلت محلها ، تفيدنا بأن الصورة الذرية من الأمور المستحيلة إطلاقا ، ونستعيض عنها بمجموعة من التخيلات البحتة المجردة ، التى ليس لها مثيل فى العالم الماكروسكوبى أو المحسوس ، وعلى ذلك يقصر دونها التصوير . وتسمى النظرية الجديدة بالميكانيكا الكمية . ولكن يبدو أن عقل الإنسان مكون بصورة يستحيل معها التفكير المتواصل بتعبيرات تامة التجريد ، إننا لنميل إما عن قصد وإما عن غير قصد ، إلى تخيل صورة ، ونجد هذه الصورة فى نموذج « بوهر » .

٢٣ ـ ٤ فروض نظرية « بوهر » ونتائجها :

ترتكز نظرية بوهر للذرة على النموذج الذى سبق أن اقترحه « رذرفورد » ، فحاول « بوهر » وضع قوانين العملية الداخلية للذرة مستعيناً بالفروض الأساسية الثلاثة .

افترض « بوهر » أن النواة عبارة عن قلب مركزى ثقيل ، ويحمل عدداً من

الشحنات الموجبة مساويا للعدد الذرى للذرة . ومقدار كل شحنة من هذه الشحنات الموجبة يساوى شحنة الإلكترون (٤٫٨ × ١٠ $^{-١٠}$ وحدة كهربية استاتيكية) ، وعلى ذلك ، فيجب أن يحيط بالنواة عدد من الإلكترونات يساوى ذ . ولتجنب اندفاع هذه الإلكترونات إلى النواة ، افترض « بوهر » أنها تدور فى مدارات دائرية مركزها النواة . وبدأ بوضع نظرية لأبسط الذرات جميعها وهى ذرة الأيدروجين ، التى تحتل أيضا ، المكان الأول فى جدول العناصر (ذ = ١) ، فافترض الفروض الأساسية الثلاثة التالية لسلوك الإلكترون ، وسوف نرمز لكتلة الإلكترون بالرمز ك ، ونصف قطر مداره نق ، وشحنته ش .

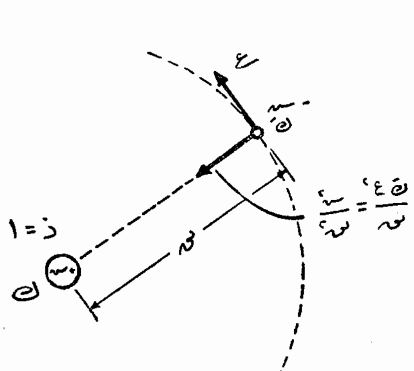
الفرض الأول : ترجع عجلة الإلكترون المركزية الجاذبة إلى الجذب الكهربى الذى تبذله النواة ، ويمكن صياغة هذا الفرض فى صورة معادلة :

$$ق = ك \, حـ = \frac{ك \, ع^{٢}}{نق}$$

$$\text{والقوة الكهربية} = \frac{ش ش}{نق^{٢}}$$

$$\therefore \frac{ك ع^{٢}}{نق} = \frac{ش^{٢}}{نق^{٢}} \qquad \text{(الفرض الأول)} \quad (٢٣ - ١)$$

أما الفرضان الثانى والثالث فهما أهم من الأول من ناحية أنهما أساسيان ، ففيهما أدخل بوهر فكرة « الكمية » التى اقترحها بلانك ، والتى استخدمها أينشتين بنجاح فى نظرية الكهروضوئية . فلقد تطلبا أن الطاقة يجب أن تكون « كمية » . على أن « بوهر » خطا خطوة أبعد من ذلك ، بأنه لم يجعل الكمية تقتصر على الطاقة فقط ، بل إن مدار الإلكترون حول النواة يجب أن يتخذ قيماً معينة كذلك ، أى أنه كمى . ولكن كيف نعبر عن كمية مثل هذا المقدار ؟ فى



(شكل ٢٣ - ١)

حالة الطاقة صاغها « بلانك » على الصورة ط = $h\,\nu$ أوتتخذ(ط)قيمة مضاعفات صحيحة فقط (ν مرات) لمقدار معين هو ثابت بلانك h. وبجعل مدار الإلكترون يتخذ قيما كمية ، يجب أن نأخذ فى الاعتبار نصف قطر المدار (نق) وكمية تحرك (ك ع) الإلكترون المتحرك فى ذلك المدار ، ويسمى حاصل الضرب ك ع نق بكمية التحرك الزاوية للالكترون ، وهى التى جعلها « بوهر » تتخذ صفة الكمية ، وإن أردنا الواقع فالمقدار ٢ π × كمية التحرك الزاوية هو الذى له صفة الكمية أى أن ٢π ك ع نق يتخذ قيما تساوى مضاعفات معينة لثابت بلانك h . واستخدام ٢ π يجعل هذه المضاعفات أعداداً صحيحة. وسوف نرمز لهذه الأعداد الصحيحة بالرمز ن بمعنى أن ن يمكن أن تتخذ القيم الصحيحة ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ... إلخ . ومعالجة الموضوع بهذه الطريقة المعقدة ظاهريا لازم لمقابلة احتياجيات= مبدأ الكمية وهى جعل المضاعفات أعداداً صحيحة . ويمكن تلخيص ما سبق ذكره كالتالى :

الفرض الثانى : يجب أن يكون حاصل ضرب كمية التحرك الزاوية للالكترون × ٢ π مساويا الثابت h مضروبا فى عدد صحيح ، ويعبر عن ذلك بالمعادلة الآتية :

كمية التحرك الزاوية = كمية التحرك الخطية × نصف القطر

= ك ع نق

وعلى ذلك تكون ٢ π ك ع نق = ن h (الفرض الثانى) (٢٣ — ٢)

حيث ن = ١ و ٢ و ٣ و ٤ ... إلخ .

وعلى الرغم من أن هذا الفرض جاء جزافا ، إلا أنه يؤدى بنا إلى حساب المدارات المحتملة للالكترون ، وحجم ذرة الإيدروجين كذلك . ويمكننا التحقق من ذلك ، إذا تخلصنا من ع فى المعادلتين ٢٣ — ١ ، ٢٣ — ٢ . فبتربيع المعادلة ٢٣ — ٢ نحصل على:

$$٤\pi^{٢}\text{ ك}^{٢}\text{ ع}^{٢}\text{ نق}^{٢} = \text{ن}^{٢}h^{٢}$$

ويمكننا إيجاد ع^{٢} من ا لمعادلة ٢٣ — ١ حيث تعطينا

$$\text{ع}^{٢} = \frac{\text{ش}^{٢}}{\text{ك نق}}$$

وبالتعويض نحصل على

$$٤\pi^{٢} \; ك^{٢} \; \frac{ش^{٢}}{ك \; نق} \; نق^{٢} = ن^{٢} \; h^{٢}$$

$$\text{أو } ٤ \; \pi^{٢} \; ك \; ش^{٢} \; نق \;\; = ن^{٢} \; h^{٢}$$

$$\text{وأخيراً } \; نق = ن^{٢} \; \frac{h^{٢}}{٤ \; \pi^{٢} \; ك \; ش^{٢}} \qquad (٢٣ - ٣)$$

حيث ن أى عدد صحيح وجميع الرموز الأخرى ثوابت :

$h = ٦,٦٢ \times ١٠^{-٢٧}$ إرج . ثانية

ك $= ٩,١١ \times ١٠^{-٢٨}$ جراما

ش $= ٤,٨٠ \times ١٠^{-١٠}$ وحدة كهربية استاتيكية

(يجب أن تكون ش بوحدات ، النظام المترى (سم جرام ثانية) ، وليست بالوحدات العملية (الكولوم) ، وذلك ، لكى نحصل على نصف القطر بالوحدات المترية) .

وعلى ذلك يكون نق $= ن^{٢} \frac{(٦,٦٢ \times ١٠^{٢٧})^{٢}}{٤ \; \pi^{٢} \times ٩,١١ \times ١٠^{-٢٨} \times (٤,٨٠ \times ١٠^{-١٠})^{٢}}$

$= ن^{٢} \times ٠,٥٢٩ \times ١٠^{-٨}$ سم

وعلى ذلك ، تكون المدارات المباحة ذات أنصاف أقطار ١ أو ٤ أو ٩ أو ٢٦ أو ٢٥ أو ٠٠٠ إلخ مضروباً ، فى $٠,٥٢٩ \times ١٠^{-٨}$ سم . وعندما يدور الإلكترون فى أصغر مداراته يكون قطر ذرة الإيدروجين مساوياً $١,٠٦ \times ١٠^{-٨}$ سم ، وهذا المقدار ، بالتأكيد ، سبقت معرفته عن أقطار الذرات (راجع الفقرة ٩ — ٨) . على أن « بوهر » حصل على هذه القيمة باستخدام ثوابت تبدو عديمة الصلة بعضها ببعض ، مثل . . ثابت بلانك وكتلة الإلكترون وشحنته .

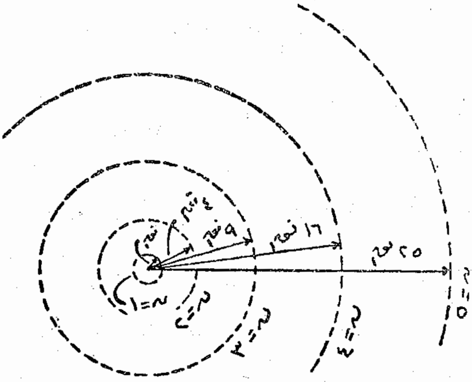
وتوضح المعادلة ٢٣ — ٣ ، أن الإلكترون يمكنه الدوران فى مدارات معينة فقط ، وذلك طبقا لما يتطلبه الفرض الثانى ، وأنصاف أقطار هذه المدارات هى :

$نق_{١} = ١ \times ٠,٥٢٩ \times ١٠^{٨}$ سم

$$\text{نق}_{٢} = ٢^{٢} \times ٠{,}٥٢٩ \times ١٠^{-٨} \text{ سم}$$

$$\text{نق}_{٣} = ٣^{٢} \times ٠{,}٥٢٩ \times ١٠^{-٨} \text{ سم}$$

ومن ذلك نرى أن نق$_{٢}$ = ٤ نق$_{١}$ ، نق$_{٣}$ = ٩ نق$_{١}$ ، نق ٥ = ٢٥ نق$_{١}$ ... إلخ (شكل ٢٣ – ٢) ومن المستحيل إطلاقا أن نجد مدارا نصف قطره ١,٥ × نق$_{١}$ أو ٧,٣ × نق$_{١}$ أو أى مضاعفا غير صحيح لنصف القطر نق$_{١}$. فما هى العوامل، إذن ، التى تمنع الإلكترون من الدوران فى تلك المدارات ؟ إننا نجد الإجابة عن هذا السؤال فى قانون الكم . . ذلك القانون الذى لقى قبولا من الناحية النظرية ، وأدى إلى نتائج تتفق مع التجربة . ومن ثم يكون التشكك فى صلاحيته ، تشككا فى جزء أساسى من نظرية ناجحة . وهذا أمر عديم الجدوى إلا إذا ظهر شىء أفضل أو أكثر استساغة .



(شكل ٢٣ – ٢)

تعرف الأعداد الصحيحة الممثلة بالرمز (ن) والتى يحدد كل عدد منها مدارا معينـًا ، بالأعداد الكمية . وعلى ذلك يكون العدد الكمى لأصغر المدارات ن = ١ وللمدار الخامس ن = ٥ وهلم جرا .

أما الفرض الثالث فقد أجاب به « بوهر » عن السؤال عما عساه أن يحدث عندما يزاح الإلكترون من مدار إلى آخر . ولفهم ذلك يلزمنا أن نعرف مقدار طاقة الإلكترون عندما يكون فى مدار معين . فللإلكترون طاقة حركة $(\frac{١}{٢} \text{ ك ع}^{٢})$ ناشئة عن حركته الدائرية، كما أن له طاقة وضع $(-\frac{\text{ش ش}}{\text{نق}})$ * ناشئة عن المجال

* طاقة الوضع هى الشغل الذى يلزم بذله لتحريك الإلكترون من موضعه على بعد نق من النواة إلى ما لا نهاية . والقوة المضادة فى هذه الحالة . . هى الجذب الكهربى الذى تبذله النواة على الالكترون . ومهما يكن من أمر فالقوة $\frac{\text{ش ش}}{\text{نق}^{٢}}$ ليست ثابتة ولاتوجد طريقة بسيطة أولية لحساب هذا الشغل ، وتبعاً لذلك

الكهربي للنواة . وعلى ذلك تكون طاقة الالكترون الكلية فى المدار الذى نصف قطره نق تساوى :

$$\text{الطاقة} = ط = \frac{1}{2} ك ع^{2} - \frac{ش^{2}}{نق}$$

ولكن تعطينا المعادلة ٢٣ — ١

$$ك ع^{2} = \frac{ش^{2}}{نق}$$

$$\therefore ط = \frac{1}{2} \frac{ش^{2}}{نق} - \frac{ش^{2}}{نق} = - \frac{ش^{2}}{2 نق} \qquad (٢٣ - ٤)$$

(حيث تعنى الإشارة السالبة أنه يجب أن يبذل الشغل على الإلكترون لإزاحته بعيداً عن النواة . . أى أن قدرته لعمل شغل فى اتجاه تزايد نق سالبة ، وفى ما لانهاية تصبح طاقة الوضع صفرا) . ويمكن وضع المعادلة ٢٣ — ٤ فى صورة تشمل ثوابت أساسية بالتعويض عن قيمة نق من المعادلة ٢٣ — ٣ ، فنحصل على :

$$ط = - \frac{1}{2} ش^{2} \frac{4 \pi^{2} ك ش^{2}}{ن^{2} h^{2}} = - \frac{2 \pi^{2} ك ش^{4}}{ن^{2} h^{2}} \qquad (٢٣ - ٥)$$

ونرى من ذلك أنه كلما كبر المدار (ممثلا بالرمز ن) قل الشغل الذى يجب أن نبذله لإزاحة الإلكترون من الذرة ، كما نتوقع من الاستنتاج البسيط . فطاقة الإلكترون تكبر كلما ابتعدنا عن النواة (هذه الطاقة سالبة ، وعلينا أن نبذل شغلا قليلا) ، وترتفع إلى سطح الطاقة الصفرية كما كان . ولإزاحة الإلكترون من مدار داخلى إلى مدار خارجى يلزم تزويده بتلك الطاقة الإضافية من الخارج ، والعكس ، إذا عاد الإلكترون من مدار خارجى إلى مدار داخلى ، فإنه يعطى طاقة تساوى الفرق بين طاقتيه فى المدارين ، ولكن كيف يعطى الألكترون الطاقة بحركته إلى مدار داخلى ؟

الفرض الثالث : عندما ينتقل الإلكترون من مدار خارجى طاقته $ط_{خ}$ إلى

علينا أن نلجأ لحساب التفاضل والتكامل للحصول على النتيجة الصحيحة . ولقد قابلنا هذه المشكلة فى استنتاج المعادلة ١٢ — ٣

مدار داخلى طاقته $ط_د$ تنبعث كمية من الإشعاع الكهرومغنطيسى طاقتها $h\nu$ ك ، $= ط_خ - ط_د$.

ولعلنا نلاحظ أن هذا الفرض فرض جرىء ، إذ أنه أنكر — بجرة قلم — نظرية « ماكسويل » للإشعاع من الإلكترون المتحرك بعجلة . فلقد افترض « بوهر » أن الكيفية الوحيدة التى يمكن بها للإلكترون أن يشع هى أن يغير مداره ، ولن يشع الإلكترون طالما كان متحركاً فى مدار واحد أيًّا كان ، حتى ولو أنه يتحرك بعجلة.. (عجلة مركزية جاذبة) وعلى ذلك فالمدار ذو الطاقة الأقل (ن = ١) مدار مستقر ، وفيه يتحرك الإلكترون إلى ما شاء الله دون أى فقد فى طاقته . وبوسيلتنا التى لا أساس لها هذه ، فى إنكار أن الإلكترون ذا الخاصية الكمية ، يشع طالما بقى متحركاً فى مداره الكمى ، نتجنب فناء الإلكترون المتحرك بعجلة ، تلك النتيجة التى تتنبأ بها نظرية « ماكسويل » الكهرومغنطيسية ؛ على أننا نسارع فى القول بأننا لم نهمل آراء « ماكسويل » كلية ، ولو أن فى ذلك مخاطرة فى إثارة الغموض . فالإلكترون الطليق يشع عندما يتحرك بعجلة ، ولكنه لن يشع عندما يكون جزءا من تركيب الذرة . ونرى من ذلك ، أننا بصدد اكتشاف أن قوانين الجسيمات الكلاسيكية (ما قبل بلانك) لابد أن تعانى فى أغلب الأحيان من تغيرات ومراجعة عندما تطبق فى حالة التركيب الذرى ، ولسوف نواصل هذا الاكتشاف كلما تقدمنا فى الدراسة .

لنعد الآن إلى الفرض الثالث ، ونضعه فى صيغة رياضية . فإذا رمزنا للعدد الكمى للمدار الخارجى بالرمز $ن_خ$ ، وللعدد الكمى للمدار الداخلى $ن_د$ ، ويمكننا كتابة المعادلة ٢٣—٥ على الصورة

$$\text{الطاقة فى المدار الخارجى} = ط_خ = -\left(\frac{2\pi^2 ك ش^4}{h^2}\right)\frac{1}{ن_خ^2}$$

$$\text{الطاقة فى المدار الداخلى} = ط_د = -\left(\frac{2\pi^2 ك ش^4}{h^2}\right)\frac{1}{ن_د^2}$$

$$\therefore \nu = ط_خ - ط_د$$

$$\text{أو } h\nu = \frac{2\pi^2 ك ش^4}{h^2}\left(\frac{1}{ن_د^2} - \frac{1}{ن_خ^2}\right) \quad \text{(الفرض الثالث)} \quad (٢٣ - ٦)$$

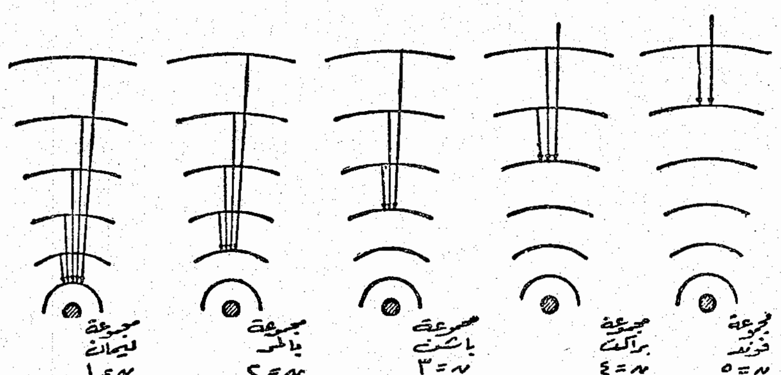
ولما كانت أجهزة قياس الأطياف تدرج عادة ، بدلالة أطوال الموجات ، وليست بالتردد ، فيمكننا وضع :

$$\nu = \frac{ع}{\lambda}$$

$$\therefore \quad \frac{h\,ع}{\lambda} = \frac{٢\,\pi^{٢}\,٢\,ك\,ش^{٤}}{h^{٢}}\left(\frac{١}{ن_{د}^{٢}} - \frac{١}{ن_{خ}^{٢}}\right)$$

$$\text{أو} \quad \frac{١}{\lambda} = \frac{٢\,\pi^{٢}\,ك\,ش^{٤}}{h^{٣}\,ع}\left(\frac{١}{ن_{د}^{٢}} - \frac{١}{ن_{خ}^{٢}}\right) \qquad (٢٣ - ٧)$$

والمعادلة (٢٣ — ٧) تتفق تماماً، مع المعادلة التجريبية المعروفة لأطوال موجات خطوط الأيدروجين الطيفية . أضف إلى ذلك ، أنها تنبأت بوجود طيف للحالة



(شكل ٢٣ — ٣)

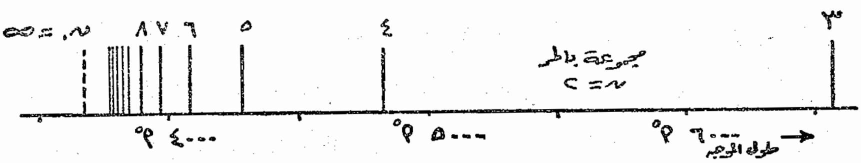
($ن_{د}$ = ١) . تلك الظاهرة ، التي لم تكتشف إلا في العام التالي. وإن أهم شيء يسترعي الانتباه ، أنها تنبأت بأطوال موجات الضوء المنبعث من ذرة الإيدروجين من مجموعة من الثوابت المعروفة، والأعداد الكمية المفروضة . فكلما تحرك الإلكترون إلى الداخل من مدار خارجي ($ن_{خ}$) إلى مدار داخلي ($ن_{د}$) استلزم ذلك انبعاث ضوء ذي طول موجه معين .

والحد الذى له المكانة الأولى فى المعادلة ٢٣ — ٧ هو $\frac{١}{\text{ن}_{\text{د}}^{٢}}$ ، إذ أنه بتثبت $\text{ن}_{\text{د}}$ تكون المنطقة الطيفية للانتقالات المتعددة من $\text{ن}_{\text{خ}}$ إلى $\text{ن}_{\text{د}}$ منطقة واحدة ، فى حين أنه بتغيير قيمة $\text{ن}_{\text{د}}$ تقع مجموعة الخطوط الطيفية بأجمعها فى منطقة طيفية مختلفة . وتلك كانت هى الظروف المساعدة التى سمحت بترتيب الخطوط الطيفية تجريبيًّا فى مجموعات ، وكل مجموعة تقابل مدارا داخليًّا معينا ، أو حالة طاقة نهائية معينة للذرة . ويوضح شكل ٢٣ — ٣ المجموعات المختلفة مقرونا بها أسماء مكتشفيها .

ويمكننا حساب المعامل الثابت الذى يظهر فى معادلة ٢٣ — ٧ :

$$\frac{٢\pi^{٢}\text{ك ش}^{٤}}{h^{٣}\text{ع}} = \frac{٢\pi^{٢} \times ٩,١١ \times ١٠^{-٢٨} \times (٤,٨٠ \times ١٠^{-١٠})^{٤}}{٣,٠٠ \times ١٠^{١٠} \times (٦,٦٢ \times ١٠^{-٢٧})^{٣}}$$

= ١,١٠ × $١٠^{٥}$ لكل سم وبوضع $\text{ن}_{\text{د}}$ = ١ ، $\text{ن}_{\text{خ}}$ = ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ . . . إلخ . يمكننا حساب أطوال موجات مجموعة ليمان التى تقع فى منطقة فوق البنفسجى البعيدة . وبوضع $\text{ن}_{\text{د}}$ = ٢ ، $\text{ن}_{\text{خ}}$ = ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٥ . . . إلخ نحصل على مجموعة « بالمر » التى تقع خطوطها الثلاثة الأولى فى منطقة الطيف



(شكل ٢٣ — ٤)

المنظور ويمكن قياسها بسهولة (شكل ٢٣ — ٤) ، والقياسات التجريبية تحقق معادلة ٢٣ — ٧ فى حدود دقة المعامل الثابت . ولقد وجدت ، فى الواقع ، جميع خطوط الإيدروجين التى تنبأت بها نظرية « بوهر » وقيست عمليًّا . وفى جميع الحالات تحققت النبوءة بالتجربة . وجاء اكتشاف كل من مجموعتى « بالمر وفوند » بعد أن تنبأ بهما « بوهر » .

٢٣ ــ ٥ مناقشة الاعتبارات التى يتضمنها نموذج « بوهر »

لعله من المفيد ، عند هذه المرحلة ، أن نلخص نموذج « بوهر » لذرة الإيدروجين . فهى تحتوى على إلكترون واحد (= $\frac{1}{١٨٣٧}$ من كتلتها الكلية) يدور حول نواة موجبة الشحنة ، تحت تأثير قوة مركزية جاذبة ناشئة عن الجذب الكهربى (الفرض الأول) . وكمية تحرك الإلكترون الزاوية لها خاصية الكمية ، التى تسمح بوجود مدارات معينة ذات مواصفات خاصة فقط (الفرض الثانى) ، وهذه المدارات مميزة بأعداد صحيحة هى الأعداد الكمية . وتشع الذرة ، فقط ، عندما ينتقل الإلكترون من مدار خارجى إلى آخر داخلى ، وهذه الطاقة عبارة عن كمة واحدة $h\nu$ (الفرض الثالث) . ولا يفيدنا النموذج عن السبب فى حدوث ذلك ، أو عن الكيفية التى ينتقل بها الإلكترون من مدار إلى آخر . أضف إلى ذلك أنه لا يعطى أى تفسير للسبب فى أن للكمة المنبعثة خواصا موجية ، ولكنه نجح نجاحاً باهراً فى تفسير الطيف الذرى للإيدروجين ، وتنبأ بحجم معقول لذرة الإيدروجين ، كل ذلك باستخدام ثوابت ليس لها صلة بعضها ببعض ظاهريًّا .

ونجح النموذج ، مع كل ، فى أمر آخر . فلقد ثبت من دراسة طيف الامتصاص للعناصر أن الذرة تمتص التردد الذى تشعه (راجع البند ١٩ ــ ٧) وطبقا لنموذج « بوهر » يتم الامتصاص عندما يزاح الإلكترون من مدار داخلى إلى آخر خارجى ، وربما يعود ثانية بإشعاع تلك الطاقة . فإذا بقى قانون بقاء الطاقة صحيحا داخل الذرة (وهذا هو أحد قوانين الفيزياء للأجسام الكبيرة التى لم تتطلب أى تعديل) ، لزم إذن ، أن تكون الطاقة المنبعثة هى الطاقة الممتصة تماما ، كما وجد عمليًّا . ويرجع السبب فى حدوث الامتصاص فى الحزمة الأصلية ، إلى أن انبعاث الموجات الضوئية مرة ثانية (بعد امتصاصها) يكون فى جميع الاتجاهات ، ويكون نصيب الحزمة الأصلية من الضوء المنبعث ثانية ضئيلا ، ولقد تحقق ذلك بإجراء تجربة مختلفة ، فإلكترون الإيدروجين يكون عادة فى أصغر المدارات (ن = ١) إذ أن طاقته تكون أقل طاقة ، وتسمى حالة الذرة التى تكون فيها الطاقة فى أقل قيمة لها بالحالة الصفرية

(يكون الإلكترون قد وصل إلى القاع ، وليس له فائض من الطاقة لإشعاعه) وإذا أزيح الإلكترون إلى مدار خارجي ، يقال : إن الذرة فى حالة استثارة . (لقد منحت طاقة) ويتطلب نموذج « بوهر » أن تكون طاقة الاضطراب كمية . . أى أن إزاحة الإلكترون لمدار معين تحتاج إلى مقدار من الطاقة ثابت ومحدد ، لنفرض أن طاقة الاستثارة هذه تستمد من مصادمات سيل من الإلكترونات تتحرك خلال الإيدروجين ، فلكى يشع الإيدروجين الخط الأول (١٢١٥ ا°) من مجموعة ليمان ($ن_{خ}$ = ٢ ، $ن_{د}$ = ١) تحتاج هذه الإلكترونات إلى مقدار من الطاقة يمكن حسابه مباشرة من النظرية الكمية :

$$\lambda = ١٢١٥ \times ١٠^{-٨} \text{ سم}$$

$$\text{ط} = h\nu$$

$$= \frac{h\ \text{ع}}{\lambda}$$

$$= ٦,٦٢ \times ١٠^{-٢٧} \times \frac{٣,٠٠ \times ١٠^{١٠}}{١٢١٥ \times ١٠^{-٨}}$$

$$= ١,٦٣ \times ١٠^{-١١} \text{ ارج}$$

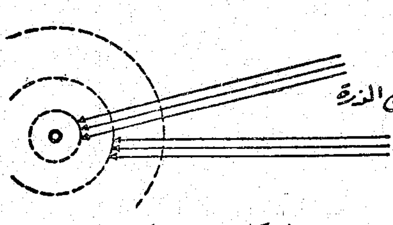
$$\text{ولما كان الألكترون فولط} = ١٦ \times ١٠^{-١٣} \text{ ارج}$$

$$\therefore \text{ط} = \frac{١,٦٣ \times ١٠^{-١١}}{١٦ \times ١٠^{-١٣}} = ١٠,٢ \text{ إلكترون فولط}$$

ويمكن التحكم بدقة عالية فى طاقة الإلكترونات المصوبة وذلك عن طريق فرق الجهد الذى تكتسب منه عجلتها . ولقد وجد أن الخط ١٢١٥ ا° لا يظهر فى طيف الإيدروجين إلا عندما تبلغ طاقة الإلكترونات المصوبة ١٠,٢ إلكترون فولط ، وبزيادة هذه الطاقة تظهر خطوط ذات طاقة أعلا فى المجموعة على التتابع . وهذا دليل واضح على خاصية الكمية للذرة .

ولا يزال لنا مطلب آخر من ذرة « بوهر » وهو تفسير وجود الطيف المستمر ، إذ حتى الإيدروجين له طيف مستمر . لنفرض صدمة ، من إلكترون أو من ذرة

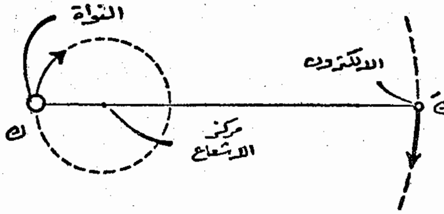
أخرى (فى التفريغ الكهربى خلال الغاز) دفعت الإلكترون خارج الذرة تماما . . أى لنفرض أن الذرة تأينت . وحيث إن الأيون موجب فهو على استعداد لأسر إلكترون طليق مار به ، وعندما يفعل ذلك ، فإن الإلكترون يهبط إلى مدار الحالة الصفرية . . إما من قفزة واحدة وإما على مراحل. والطاقة المنبعثة ككمة فى هذه العملية ، عبارة عن الفرق بين الطاقة للمدار الخارجى النهائى (ن = ∞) والطاقة للمدار الذى تستقر فيه مضافا إليها طاقة حركة الإلكترون عند أسره ، وطاقة حركة الالكترون الطليق ليست كمية ، ويمكن أن تتخذ أية قيمة (راجع التوزيع المستمر للسرعات الحرارية الذى كشفت عنه نظرية الحركة) . وعلى ذلك ، فبالرغم من أن الإلكترون المأسور يتخذ طاقة حركة فريدة ، فالإلكترونات الحرة الأخرى قد تكون ذات طاقة حركة أعلى أو أقل قليلا ، وتكون نتيجة أسر الملايين من الإلكترونات الحرة بالملايين من الأيونات الموجبة ظهور إشعاع ذى طيف مستمر لكمات لها جميع الطاقات بدلا من ظهور مجموعات من الخطوط . وواضح أنه فى حالة الإيدروجين يجب أن تكون هناك مناطق متعددة للطيف المستمر ، تقابل كل منها أسر الإلكترون الطليق فى مدار معين (شكل ٢٣ — ٥) وتقع كل منها فى الجانب العالى التردد من مجموعة معينة ، حيث أن التوزيع المستمر لطاقات الحركة يمثل طاقة أكبر من طاقة المدار الخارجى النهائى . ولقد شوهدت جميع الأطياف المستمرة كما جاء التنبؤ بها تماما .



(شكل ٢٣ — ٥)

٢٣ — ٦ تأثير كتلة النواة ، وأطياف النظائر :

قد افترضنا فى الفرض الأول « لبوهر » ، كما عرضناه ، أن الإلكترون يدور حول النواة كمركز ثابت . وهذا فى الواقع غير صحيح ، إذ أن الاثنين ، الإلكترون والنواة ، يدوران حول مركز مشترك يقع فى مكان ما بينهما (شكل ٢٣ — ٦) .



(شكل ٢٣ – ٦)

وواضح ، من التماثل ، أنه إذا كان الإلكترون والنواة متساويين فى الكتلة ، فإن هذا المركز يقع فى منتصف المسافة بينهما ، ولكن ، لما كانت النواة أثقل بكثير من الإلكترون ، فإن مركز الدوران يكون قريبا جدا منها ، وبتغير مدار الإلكترون والطاقة عن القيم التى تعطيها المعادلتين ٢٣ – ٣ ، ٢٣ – ٥ تغيراً طفيفاً فقط .

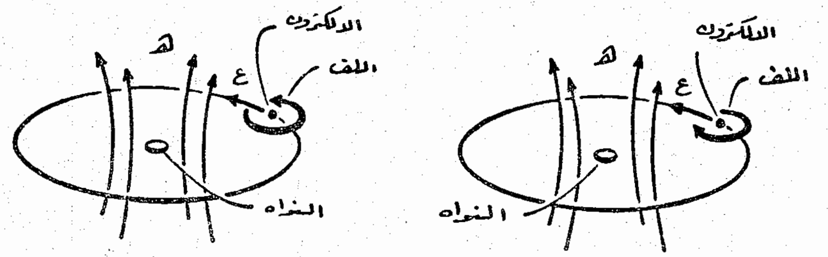
وأسهل الطرق لتصحيح الخطأ الناتج عن هذا التأثير ، هى أن نستعيض عن الكتلة الحقيقية للإلكترون (ك) بكتلة وهمية أقل قليلا من ك بمقدار يتوقف على كتلة النواة . وعلى ذلك فيتوقف الحد الثابت فى المعادلة ٢٣ – ٧ على الكتلة النووية ، كما يتوقف على كتلة الإلكترون . وتكون قيمته أقل للنوى الخفيفة . ولقد شوهد ذلك ، لأول مرة ، بمقارنة مجموعة « بالمر » لطيف الإيدروجين بطيف الهيليوم المتأين (ذرة هيليوم ينقصها إلكترون واحد) الذى يمكن دراسته هو الآخر بنظرية « بوهر » . وأدى تأثير الكتلة النووية إلى اكتشاف الإيدروجين الثقيل (ذى عدد الكتلة ٢) فى عام ١٩٣٢ . ويظهر التأثير فى أطياف أخرى كثيرة عندما يوجد أكثر من نظير واحد ، وبهذه الطريقة اكتشفت نظائر عديدة جديدة . ويمكن تعيين كتل النظائر بالقياس الدقيق للإزاحات النظرية .

٢٣ – ٧ لف الإلكترون :

كان معروفا ، قبل ظهور نظرية « بوهر » بزمن طويل ، أن كثيرا من الخطوط الطيفية تتكون من مركبتين قريبتين جداًّ من بعضهما ، فالخط الأول فى مجموعة « بالمر » (٦٥٦٣ ا°) مثلا يظهر كخطين تفصلهما مسافة قدرها ٠,١٤ ا° . ويظهر الانفصال كبيراً فى الذرات الأخرى ، ويمكن رؤيته بسهولة بالمطياف البسيط . فخط الصوديوم الأصفر ، مثلا ، يتكون من مركبتين تفصلهما مسافة قدرها ٦ ا° ، ولقد فسر هذا الازدواج فى عام ١٩٢٥ بخاصية جديدة للإلكترون هى اللف.

لنأخذ حالة إلكترون يدور حول نفسه حول محور مركزى ، فى هذه الحالة

ينشأ تيار كهربى ضعيف ويتولد مجال مغنطيسى (راجع الفقرة ١٤ — ٥)، كما لو كان هناك مغنطيس صغير منطبق على محور الدوران . ونحن نعلم أن المغنطيس العادى عندما يوضع فى مجال مغنطيسى يميل إلى اتخاذ اتجاه المجال .



لف مواز معكوس   لف مواز معتدل

(شكل ٢٣ — ٧)

وللإلكترون الذى يلف حول نفسه ، تمشياً مع الخواص الكمية ، وضعا استقرار فى المجال المغنطيسى أحدهما مواز معتدل والآخر مواز معكوس ، وينتج المجال المغنطيسى فى الذرة عن الحركة المدارية للإلكترون ، مثل التيار الدائرى (شكل ٢٣ — ٧) ، وعلى ذلك ، فللإلكترون الذى يلف حول نفسه فى هذا المجال وضعا استقرار ، وبهذا تزدوج كل حالة طاقة نتيجة للف الإلكترون . وتزدوج الخطوط الطيفية التى تنشأ عن الانتقالات بين تلك الحالات .

٢٣ — ٨ القشر الإلكترونية والتكافؤ :

لم يقتصر نجاح نموذج « بوهر » على التنبؤ بالأطياف والربط بينها ، بل امتد أفقه إلى مدى أوسع . فلقد اقترح « بوهر » ، على أساس الخواص الكمية ، أن الإلكترونات فى الذرات الأثقل من الإيدروجين مرتبة فى مدارات أو قشر . وحقق هذا النظام احتياجات كل من علم قياس الأطياف ، والكيميا ، كما ينبغى أن تحققها أى نظرية ذرية ناجحة ، وأمكن التنبؤ بالترتيبات الإلكترونية المسئولة عن التكافؤ الكيموى* .

* التكافؤ الكيموى للذرة هو عدد الإلكترونات فى القشرة الخارجية (تكافؤ موجب) أو عدد الألكترونات اللازمة لإكمال القشرة الخارجية (تكافؤ سالب) ، وفى بعض الحالات يشترك فى الاتحاد الكيموى عدد من الإلكترونات أقل من إلكترونات التكافؤ .

بنى نموذج « بوهر » القشرى على قاعدة استنتجت من دراسة الأطياف ، ويعطينا هذا النموذج ما يأتى :

١ ـ تتخذ القشرة الإلكترونية أرقاما هى العدد الكمى ن حيث ن = ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ . . . .

٢ ـ لا تحتوى القشرة على أكثر من ٢ ن٢ إلكترون .

٣ ـ تملأ القشرة ، بصفة عامة ، على التتابع ، إذ أن هذا الإجراء يؤدى إلى أقل قيمة للطاقة ، للذرة المعينة . . أى أنه إذا ملئت القشرة بطريقة أخرى مخالفة للتتابع ، فإن الذرة تشع وتنتقل إلى حالة أقل طاقة .

٤ ـ القشرة المملوءة خاملة كيمويا .

ولنبدأ بالإيدروجين ، فقشرة الحالة الصفرية رقمها (ن =١) ولا تحتوى إلا على إلكترون واحد . وتحتوى ذرة الهيليوم على إلكترونين فى القشرة (ن = ١) وبذلك تكمل (٢ × ١٢ = ٢) ، والهيليوم خامل كيمويا بالطبع . وتحتوى ذرة الليثيوم على إلكترونين فى القشرة (ن = ١) ، وإلكترون واحد فى القشرة (ن = ٢) وتكافؤها ١ ، وذلك نتيجة لوجود الإلكترون فى قشرتها الخارجية (ن = ٢) . وتحتوى ذرة البريليوم على إلكترونين فى القشره (ن = ١) ، وإلكترونين فى القشرة (ن = ٢) وتكافؤها ٢ . وتمتلئ القشرة (ن = ٢) بعدد من الإلكترونات يبلغ (٢ × ٢٢ = ٨) ، ويحدث ذلك فى حالة النيون الذى يحتوى على ثمانية إلكترونات فى القشرة (ن = ٢) ، وإلكترونين فى القشرة (ن = ١) ، وهو غاز خامل كيمويا ، وينتج عن إضافة إلكترون آخر تركيب ذرة الصوديوم (عددها الذرى ١١) ، وبذلك تحتوى القشرة (ن = ٣) على إلكترون واحد ، ويعطينا الصوديوم أحادىّ التكافؤ كما هو معروف ** .

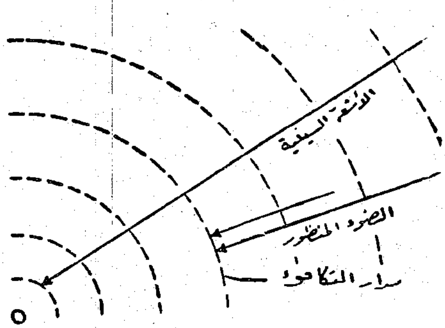
** ربما نتساءل عن السبب فى أن الأرجون الذى يحتوى على إلكترونين فى القشرة (ن = ١) وثمانية إلكترونات فى القشرة (ن = ٢) ، وثمانية إلكترونات فقط ، فى القشرة (ن = ٣) (بدلا من ثمانية عشر

ويستمر هذا الترابط بالتكافؤ الكيموى فى الجدول الدورى للعناصر بأكمله (انظر الجدول هـ) . وعلى ذلك ، فيشمل العمود الأول جميع الذرات التى تحتوى على إلكترون واحد فى قشرة غير مكتملة ، ويشمل العمود الثانى الذرات التى تحتوى على اثنين من تلك الإلكترونات ، ويشمل العمود السابع الذرات التى ينقصها إلكترون واحد لإكمال القشرة ، فالفلور مثلا ، يحتوى على إلكترونين فى القشرة (ن = ١) وسبعة إلكترونات فى القشرة (ن = ٢) . ويشمل العمود الثامن الغازات النبيلة الخاملة المكتملة القشر .

وتكوين الأملاح مثل ص كل عبارة عن إعارة إلكترون من الصوديوم للكلورين ، فينتج من ذلك قشر مكتملة لكل من الذرتين . وهذا هو ما يعرف بالربط الأيونى – ربط ص+ مع كل– . ويتنبأ النموذج أيضا بحقائق كيموية أخرى لا محل لذكرها هنا .

٢٣ – ٩ طيف الأشعة السينية الخطى :

نجحت نظرية « بوهر » فى التنبؤ بالمظاهر الأساسية لطيف الأشعة السينية الخطى . (راجع الفقرة ٢٢ – ٥) ، وتحدث الأشعة السينية ، بالطبع ، عندما يكون الهدف مكونا من ذرات ثقيلة فقط . ويزداد تردد خطوط الأشعة السينية بازدياد العدد الذرى ، وتتضح هذه الحقائق إذا افترضنا أن طيف الأشعة السينية الخطى ينتج عن انتقالات الإلكترونات للمدارات الداخلية للذرات الثقيلة (شكل ٢٣ – ٨) .



شكل ٢٣–

فى عملية توليد الأشعة السينية تصطدم الإلكترونات السريعة بالهدف ، وقد تقذف بإلكترون من قشرة داخلية ولتكن القشرة (ن = ١) مثلا .

إلكترونا) من الغازات الخاملة كذلك . فلقد تمادينا فى التبسيط ، وتوجد قشر ثانوية مستقرة بصفة خاصة وهى المسئولة عن هذه الحقيقة

وبذلك ، تترك الذرة فى حالة من أنواع التأين الداخلى . وتملأ هذه الفجوة الداخلية فى الحال بإلكترون من قشرة خارجية ، وتنبعث كمة من الأشعة السينية أثناء هذه العملية. وهناك قشر عديدة داخلية وخارجية متبادلة مسموح بينها الانتقال الذى ينشأ عنه خطوط طيفية عديدة مختلفة للأشعة السينية .

وإذا أردنا أن نلم بفكرة عن الترددات المنبعثة فى مثل هذه العمليات ، نأخذ حالة ذرة ثقيلة عددها الذرى ذ . وبإهمال تأثيرات الإلكترونات الأخرى ، نجد أن الفرض الأول « لبوهر » يعطينا $\frac{\text{ذ ش}^{٢}}{\text{نق}^{٢}} = \frac{\text{ك ع}^{٢}}{\text{نق}}$ ، ولقد استبدلنا ، بالتأكيد (ذ ش) بكل (ش) فى حالة نواة الإيدروجين ، وبذلك تصبح طاقة الحالة الإلكترونية طبقا للمعادلة (٢٣ — ٥) كما يلى :

$$\text{ط} = \frac{٢ \pi^{٢} \text{ك ش}^{٤}}{\text{ن}^{٢} h^{٢}} \text{ذ}^{٢} = -١٣,٦ \text{ ذ}^{٢} \text{ إلكترون فولط}$$

فنحتاج طبقا لهذا النموذج إلى ١٣,٥ × (٢٩)^{٢} = ١١٤٠٠ إلكترون فولط لإزالة إلكترون من القشرة (ن = ١) لذرة النحاس ذات العدد الذرى ٢٩ ، هذا بالمقارنة بالمقدار ١٣,٥ إلكترون فولت فى حالة الإيدروجين . ويجب أن تبلغ طاقة الإلكترون المصطدم هذا المقدار على الأقل لكى يتمكن من إتمام العملية . وتقع الانتقالات بين القشر الداخلية فى الذرات المتوسطة فى الثقل ، فى حدود عدة عشرات الآلاف من الإلكترون فولط . وحيث أن ١٠^{٤} إلكترون فولط = ١٦ × ١٠$^{-٩}$ إرجا ، فالانتقال الذى يعطى ١٠^{٤} إلكترون فولط تنتج عنه كمة (طا = $h\nu$) طول موجتها :

$$\lambda = \frac{\text{ع}}{\nu} = \frac{h \text{ ع}}{\text{ط}} = \frac{٦,٦ \times ١٠^{-٢٧} \times ٣ \times ١٠^{١٠}}{١٦ \times ١٠^{٩}} = ١,٢ \text{ أ}^{\circ}$$

وتنشأ خطوط الأشعة السينية ذات أعلى تردد من الانتقالات إلى القشرة الداخلية (ن = ١) عندما يكون الإلكترون قد أزيل من هذه القشرة . وتسمى هذه المجموعة بالمجموعة « ك » وهى شبيهة — إلى حد ما — بمجموعة ليمان . وواضح أن ترددات « خطوط ك » تزداد بازدياد ذ^{٢} وهذا مطابق للنتائج العملية .

ويجب أن يكون واضحا أنه لا يوجد فرق أساسى بين الأشعة السينية والضوء المنظور إلا فى اختلاف أطوال موجاتهما . فينشأ كل منهما عندما ينتقل الإلكترون بين المدارات ، فإذا كان المدار النهائى مدار تكافؤ كانت الكمة مرئية (أو قريبة من المنطقة المنظورة) ، أما إذا كان المدار النهائى مدارا داخلياً نتجت كمة أشعة سينية . ومن المؤكد أن مجموعة ليمان للإيدروجين هى طيف الأشعة السينية الناتجة منه .

٢٣ ــ ١٠ فشل نظرية « بوهر » :

فسرت نظرية « بوهر » عددياً أطياف الإيدروجين والذرات « الأيونات الأخرى الأحادية الإلكترون من هى + ، لى ++ . . . إلخ . على أن الهيليوم المتعادل يحتوى على إلكترونين ، وهنا ينشأ السؤال عن : أى إلكترون منهما يقوم بالانتقال ؟ أو هل يقوم كلاهما بالعملية ؟ ويصبح هذا السؤال مشكلة حادة فى حالة ذرة مثل ذرة الفلور التى تحتوى على سبعة إلكترونات تكافؤ . فهل تبقى ستة منها ساكنة وتترك الإلكترون السابع لإشعاع الكمات ، أم هل تتفاعل فيما بينها بكيفية ما ؟ لقد كانت الإجابات الخالية من الغموض التى أمكن الحصول عليها من نظرية « بوهر » ، حتى بعد تعديلها قليلة . ولكن النظرية لا زالت مفيدة لحالات العناصر الشبيهة بالإيدروجين كالمعادن القلوية (العمود الأول من الجدول الدورى ــ الجدول هـ) التى تحتوى على إلكترون تكافؤ واحد فقط . وحتى فى هذه الحالة نشأت مشكلة تداخل المدارات .

وعلى ذلك أعلن الحكم على تقدم نظرية « بوهر » بعد عشرة أعوام من ظهورها ، وجاء كما يأتى على وجه التقريب : إنها تصلح لأطياف الإيدروجين والهليليوم المتأين ، ولا بأس بها فى حالات الذرات الأحادية التكافؤ ، ولكنها لا تصلح مطلقاً فى حالات الذرات العالية التكافؤ . وكذلك ساد شعور عدم الارتياح لافتقار فروض « بوهر » إلى الأسس المنطقية . فقضى عليها على هذا الأساس ، ولكنها كانت موضوعا للاستفهام . أما أنها تطاولت على نظرية « ماكسويل » الكهرومغنطيسية (القائلة بأن الإلكترون المتحرك بعجلة يجب أن يشع) فلا جريمة فى ذلك ، إذ أن

هذه النظرية أعطت نتائج غير صحيحة فى المسائل الذرية ، ولكنه يدعو إلى الغرابة أن يقال : إن الإلكترون الطليق يشع عندما يتحرك بعجلة ، فى حين أن المقيد فى الذرة لا يشع .

ولقد أجابت نظرية الميكانيكا الكمية الحديثة عن معظم هذه المتناقضات ، على أن هذه النظرية لا تعطى — كما سبق أن ذكر فى أوائل هذا الباب — نموذجا ذريًّا ، ولكنها تزودنا بطريقة للحساب ، وسوف نرى فى الباب التالى نقطة الابتداء الأساسية للميكانيكا الكمية .

تمارين :

١ — احسب النسبة بين حجم الذرة وحجم النواة بفرض أنهما كرويتان وأن قطر الذرة يقع فى حدود ١ أنجستروم وقطر النواة حوالى $١٠^{-١٢}$سم .

الجواب : $١٠^{١٢}$

٢ — من المعتقد أن نصف قطر نواة ذرة الإيدروجين يساوى $١,٥ \times ١٠^{-١٣}$سم ، فإذا تصورنا أنه كبر إلى ٠,١ سم (حبيبة غبار) فكم يبلغ بعد إلكترون الحالة الصفرية عن النواة فى هذه الحالة ؟

الجواب : ٣,٥ متر

٣ — احسب السرعة المدارية لإلكترون الحالة الصفرية (ن = ١) لذرة الإيدروجين طبقا لنظرية « بوهر » .

الجواب : $٢,٢ \times ١٠^{٨}$ سم / ث

٤ — احسب أطوال موجات الخطوط الثلاثة الأولى فى مجموعة بالمر .

الجواب : ١٦٥٦٣°، ١٤٨٦١°، ١٤٣٤٠°

٥ — احسب جهد التأيين (الطاقة بالإلكترون فولط اللازمة لتأيين الذرة فى حالتها الصفرية) لذرة الإيدروجين (المعامل فى المعادلة ٢٣—٦=$٢,١٧ \times ١٠^{-١١}$إرإج) .

الجواب : ١٣,٦ إلكترون فولط

٦ — تصبح ذرة الهيليوم عندما تتأين بفقد إلكترون واحد ذرة أحادية الإلكترون وتتبع نظرية « بوهر » . فاحسب نصف قطر المدار الداخلي جداً للأيون هي + . (أعد كتابة المعادلة ٢٣—١ لتلائم نواة شحنتها (+ ٢ ش) وادمجها في المعادلة ٢٣ — ٢) .

الجواب : ٠,٢٦٥ × ١٠ —٨ سم

٧ — اكتب أعداد الإلكترونات في القشر المختلفة لذرات الغازات الخاملة : الهيليوم والنيون والأرجون والكريبتون .

مراجع مقترحة للاطلاع :

Born, Max, "The Restless Universe" London, Blackie & Son, 1935.

يحوى الباب الرابع سرداً مبسطاً واضحاً لذرة « بوهر » .

"Foundation of Nuclear Physics" New York, Dover Publications 1949.

تحوى ص ١١١ لوحة لبحث « رذرفورد » الذى يقترح فيه الذرة النووية . ويمكن قراءة بعض أجزاء هذه اللوحة .

Gerlach, W. "Matter, Electricity, Energy" New York, D. Van Nostrand Co., 1928.

يلخص الباب السادس عشر تلخيصاً وافياً طبيعة انتقال الطاقة في ذرة « بوهر » .

الفصل الرابع والعشرون

الخاصية الثنائية للجسيمات والموجات

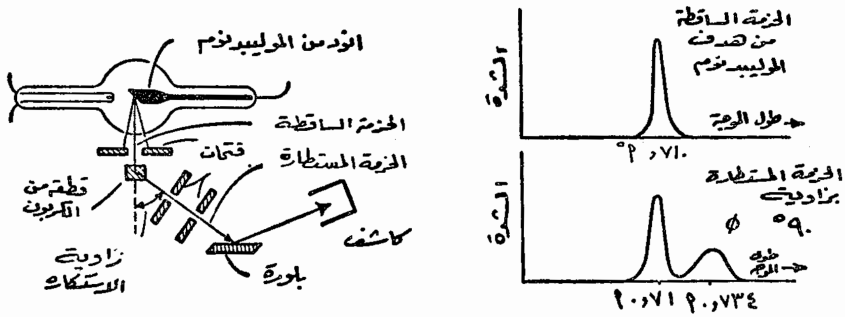
٢٤ ــ ١ نشأة « جسيمات » الضوء و « موجات » الجسيمات :

يجدر بنا وقد وصلنا إلى هذه المرحلة الفاصلة ، أن نستعرض الصورة التى أخذناها عن كمة الإشعاع ، ونحكم تحديدها ، إذ أننا سوف نرى قريبا ، أن هذه الصورة اتسعت اتساعاً كبيراً . فمنذ الوقت الذى ابتكرها فيه « بلانك » فى نظريته عن إشعاع الأجسام الجامدة الساخنة عام ١٩٠٠ ، إلى وقت ظهور نظرية « بوهر » للطيف الخيطى عام ١٩١٣ ، كان ظهور كمة الإشعاع مرتبطا بانبعاث الإشعاع من المادة وامتصاصه بها فقط . واكتشفت عمليات كمية جديدة خلال هذه الفتحة ، ولكن الكمات ذاتها لم تكتسب صفات جديدة ذات أهمية . ففى عملية انبعاث خط طيف الإيدروجين يعطى إلكترون الذرة الطاقة التى تنبعث على صورة كمة ضوئية ذات تردد معين ν = (طخ ــ طء) $/h$ ، ولكن لم يتيسر معرفة أى شىء آخر عن الكمة فيما عدا ترددها . وفى الانبعاث الكهروضوئى تختفى الكمة عندما تنتقل طاقتها إلى إلكترون فى الكاثود الضوئى ، فالكمة تدخل فى النظرية على أساس أنها طاقة قدرها $h\nu$. ومن ذلك كله انتهى بنا الحال إلى التفكير فى أن الموجة الضوئية ، عبارة عن سيال من الكمات ــ فخط الطيف ليس موجة مستمرة ولكنه مجموعة من الموجات المحدودة متساوية التردد ، وتنبعث كل واحدة منها من ذرة مشعة واحدة ، كما أن كلا منها مصحوب بكمة واحدة . ولكن النظريات السابق ذكرها ، لا تحتاج إلى هذه الصورة ، إذ أن هذه النظريات تهتم فقط ، بمولد الكمات وفنائها ، والنظر الآن فى الآراء العديدة عن وجودها ، بين مولدها وفنائها .

لم يكن هناك حتى عام ١٩٢٣ ، أى برهان مباشر لخواص الكمات الطليقة أو الفوتونات . . وهو الاسم الذى أطلق عليها لتمييز كمة الإشعاع $h\nu$ عن المقادير الكمية الأخرى ، مثل كمة التحرك الزاوية « لبوهر » وكمة الطاقة الذرية ، وكمة الشحنة

الإلكترونية وما إلى ذلك . على أن « كومتن » وجد فى العالم نفسه أن الفوتونات يمكنها أن تغير من ترددها عندما تتشتت ويمكن تفسير ذلك بتخصيص خواص ميكانيكية (الامتداد المحدود وكمية التحرك) للفوتونات . ولقد أجاب هذا الاكتشاف الثورى عن كثير من الأسئلة عن الكمات المنفردة فى الحالة الطليقة .

يختلف الدور الذى تلعبه الخواص الميكانيكية للفوتون اختلافا كلياً عنه فى الموجات الكهرمغنطيسية ، فالتداخل مثلا ، يحدث كخاصية لهذه الموجات ، فى



(شكل ٢٤ — ١)

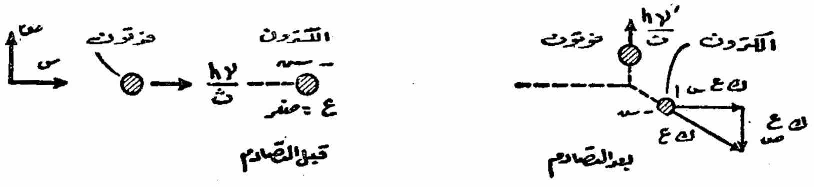
حين أن التشتت العادى للضوء والأشعة السينية يحدث كخاصية للجسيمات (نعنى بكلمة العادى . . أى الذى لا يصاحبه تغير فى التردد) ، وحتى اقتران كمية التحرك بالموجة ليس من الآثار الكمية ، إذ أن ضغط الضوء شوهد وفسر بنظرية «ماكسويل على أنه التغير فى كمية التحرك الحادث بانعكاس الموجات . ولكن لا نجد فى النظرية الموجية بأكملها أى دلالة ، على أن فى إمكان الموجة تغيير ترددها بالكيفية التى ظهر بها أثر « كومتن » . فيجب أن ينظر إلى ذلك على أنه نتيجة لطبيعة الفوتونات الجسيمية .

تقدم « لوى دى برولى » ، فى عام ١٩٢٤ بعد هذا الانقلاب فى نظرية الضوء بقليل ، برأى يرمى إلى أن الجسيمات يمكن أن يكون لها طول موجة ، كما أنها قد تظهر تأثيرات تداخل ، وفى عام ١٩٢٦ طبقت هذه الآراء على الإلكترونات فى الذرة ، وبتمثيلها بموجات وجد أن الخاصية الكمية لطاقة الذرة تأتى كنتيجة طبيعية لازمة للموجات الساكنة فى « المدارات » المستقرة للإلكترون . وفى عام ١٩٢٧

اكتشف دافيسون وجيرمر لأول مرة عمليًّا ، الخواص الموجية للجسيمات الطليقة ، عندما شاهدا نموذج التداخل الذى أحدثته حزمة من الإلكترونات عانت حيودا فى بلورة ، وبذلك حققا وجود الموجات الجسيمية ، وكذلك معادلة « دى برولى » التى تحدد طول موجتها ، ومن ثم كملت صورة الخاصية الثنائية الجسيمية الموجية ، فللضوء خواص الجسيمات ، وللجسيمات الذرية خواص الموجات .

٢٤ – ٢ كمية تحرك الفوتونات – أثر « كومتن » :

كان « كومتن » يدرس تشتت الأشعة السينية عندما اكتشف أن ترددها يمكن أن يتغير أثناء عملية التشتت . وكانت تجربته شبيهة بصفة عامة بتجارب من سبقة من الباحثين ، تلك التجارب التى كانت مصممة لوضع تشتت الأشعة السينية فى إطار النظرية الكهرمغنطيسية ، ولكن « كومتن » اختلف عن سابقيه فى أنه استخدم مطيافا للأشعة السينية لقياس أطوال الموجات فى الحزمة المشتتة بدقة فوجد ، بالإضافة إلى طول موجة الحزمة الساقطة ، أن هناك جزءا من الحزمة المشتتة بطول موجة أكبر ولكنه محددا ، ويرى الجهاز الذى استخدمه موضحا فى شكل ٢٤ – ١ حيث استخدم أنبوبة للأشعة السينية ذات أنود من المولبيدنوم . وكشف عن الجزء ذى الموجة الطويلة فى الحزمة المشتتة فى اتجاهات مختلفة أى عند زوايا تشتت مختلفة ، ووجد أن طول الموجة يتوقف على زاوية التشتت ، ولو أنه لا يتوقف على طول الموجة الساقطة على المادة المشتتة . فتقدم برأيه فى ذلك وهو أن هذا الخط ذا الموجة الطويلة ناتج عن تصادم الفوتون بإلكترونات المادة المشتتة ، وعامل الإلكترونات على أنها طليقة وساكنة قبل التصادم . أى غير مقيدة فى ذرة الكربون أو أى ذرة أخرى فى المادة المشتتة وكذلك خصص للفوتون طاقة قدرها $h\nu$ ، وكمية تحرك $\frac{\nu h}{ع}$



(شكل ٢٤ – ٢)

أثناء معالجته للنظرية* . وافترض « كومتن » أن التصادم مرن ، فالفوتون والإلكترون يكونان مجموعة من جسيمين تتبع قانونى بقاء الطاقة ، وبقاء كمية التحرك .

ويمكن إجراء حسابات التغير فى طول الموجة تفصيليـًّا بسهولة تامة عندما تكون زاوية التشتت ٩٠° ، فلنأخذ الحالة المبينة فى شكل ٢٤ ــ ٢ ، ونكتب معادلتى بقاء الطاقة وبقاء كمية التحرك ، وواضح أن المركبة الأفقية (محور س) لكمية التحرك تتبع قانون البقاء :

$$\frac{h\,\nu}{\text{ء}} = \text{ك ع}_{\text{س}}$$

والمركبة الرأسية لكمية التحرك:

$$\frac{h\,\nu'}{\text{ء}} = \text{ك ع}_{\text{ص}}$$

حيث ν' هى تردد الكمة المشتتة ، وتعطى المعادلة شرط بقاء الطاقة (بإهمال تأثير النسبية) .

$$h\,\nu = h\,\nu' + \tfrac{1}{2}\,\text{ك ع}^{2}$$

وحيث أن $\text{ع}^2 = \text{ع}^2_{\text{س}} + \text{ع}^2_{\text{ص}}$ ، فبالتعويض من معادلة كمية التحرك نحصل على :

$$\text{ع}^{2} = \left(\frac{h}{\text{ك ء}}\right)^{2} \left(\nu^{2} + \nu'^{2}\right)$$

وبالتعويض فى معادلة الطاقة نحصل على :

$$h\,\nu = h\,\nu' + \frac{1}{2}\,\frac{h^{2}}{\text{ك ء}^{2}}\left(\nu^{2} + \nu'^{2}\right)$$

$$\therefore\ \nu - \nu' = \frac{h}{\text{٢ ك ء}^{2}}\left(\nu^{2} + \nu'^{2}\right)$$

---

* الطاقة الكلية للجسيم المتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء تساوى ك ء^2 وكمية تحركه ك ء وعلى ذلك فكمية التحرك فى هذه الحالة = $\frac{\text{الطاقة}}{\text{ء}}$ ، ويؤدى بنا ذلك إلى أن نخصص كمية تحرك للفوتون تساوى $\frac{h\,\nu}{\text{ء}}$ ، وربما جاز لنا أن نخصص له كتلة = $\frac{\text{كمية التحرك}}{\text{السرعة}} = \frac{h\,\nu}{\text{ء}^2}$ ، على أن الفوتون ليس له كتلة ساكنة ، ومثل هذا الإجراء إجراء مفتعل .

وبكتابة النتيجة بدلالة طول موجة الأشعة السينية $\lambda = \frac{ع}{\nu}$ ، $\lambda' = \frac{ع}{\nu'}$

نحصل على :

$$\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} = \frac{h}{2ك ع}\left(\frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda'^2}\right)$$

أو
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{2ك ع} \times \frac{\lambda'^2 + \lambda^2}{\lambda \lambda'}$$

وحيث إن التغير فى طول الموجة $(\lambda' - \lambda)$ صغير جداً بالنسبة إلى طول الموجة λ فيمكننا اعتبار $\lambda'^2 = \lambda^2$ تقريبا وعلى ذلك :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{ك ع} \text{ تقريبا}$$

$$= \frac{6{,}6 \times 10^{-27}}{9{,}1 \times 10^{-28} \times 3 \times 10^{10}} = 0{,}024 \text{ أ}^\circ$$

وتطابق هذه النتيجة تماما ، النتيجة التى تم الحصول عليها عملياً لزاوية التشتت ٩٠° . وتقل الإزاحة فى طول الموجة عند زوايا التشتت الصغيرة ، وتصبح صفرا عند زاوية التشتت ϕ = صفر كما أنها تزداد إلى النهاية العظمى عند ϕ = ١٨٠° (التشتت الخلفى) حيث تتخذ القيمة $\frac{2h}{ك ع}$ ، ويسمى المقدار $\frac{h}{ك ع}$ فى بعض الأحيان طول موجة كومتن .

أصبح واضحا ، نتيجة لتلك التجارب والنظرية السابق ذكرها ، أن الفوتونات توجد على صورة جسيمات ، . . أى أنها محددة فى الفضاء ولها كمية تحرك . وفى التصادمات يكون سلوكها كسلوك الجسيمات تماما ، ولا تأخذ خواصها الموجية أى دور فى ذلك ظاهرياً ، ولكنها جسيمات من نوع فريد ، إذ ليس لها كتلة ساكنة . وإذا كان من الصعب علينا تصور جسيم بدون كتلة ساكنة يقوم بعملية تصادم ، فذلك يرجع إلى ضعف فينا فى رغبتنا فى إعطاء الأمور صورة مأخوذة من خبرتنا

العادية . فطبيعة الفوتون الحقيقية تتضمن كلا من خواصه الموجية والجسيمية ، ونحن فى وصفنا له كمركب من هاتين الخاصتين ، إنما نستعير هذا الوصف من فيزياء الأجسام الكبيرة .

ربما نتساءل عند هذه المرحلة ، عما إذا كانت جميع كمات الإشعاع لها خواص فوتونات الأشعة السينية ، فهل يوجد تأثير « كومتن » فى حالة الضوء المنظور ؟ ويجب علينا أن نسلم بأننا لم نشاهد هذا التأثير . ولكن ذلك لا يرجع إلى نقص فى صورة الفوتون وقد فسرته النظرية ، ولكنه برجع إلى أنه لاتوجد إلكترونات يمكن اعتبارها طليقة بالنسبة لفوتونات الضوء المنظور لإحداث تأثير « كومتن » . فقوة ربط الإلكترونات بالذرة لا يمكن إهمالها بالمقارنة بطاقة كمة الضوء ، كما هى الحال بالنسبة لفوتونات الأشعة السينية العالية الطاقة . وقوة الربط هذه تنقص من احتمال حدوث تشتت « كومتن » كلما زاد طول الموجة ، فخط « كومتن » يكون ضعيفاً فى منطقة الأشعة السينية المنخفضة الطاقة . ويختفى بالاستمرار فى تناقص تردد الكمة . وفى الوقت نفسه يزداد احتمال حدوث التشتت العادى . . أى التشتت بدون تغير فى التردد ، بتناقص التردد ، وعلى ذلك يتم الانتقال إلى التشتت العادى فى منطقة الضوء المنظور .

٢٤ ــ ٣ الطبيعة الموجية للجسيمات ــ « دى برولى » :

نشأت الطبيعة الموجية للجسيمات عن الدراسة النظرية ، ولم تأت كنتيجة للتجربة العملية ، مثلها فى ذلك مثل نشأة كمة الإشعاع ، فلقد تنبأ « دى برولى » بالطبيعة الموجية للجسيمات عام ١٩٢٤ ، وكان اهتمام « دى برولى» منصباً على الحقيقة . . إنه على الرغم من أن النظرية الكمية نشأت كوصف للإشعاع إلا أن « بوهر » بين أنه يجب أن تمتد لتشمل حركة الجسيمات الذرية .ثم أليس من المحتمل قلب النظرية الكمية التى قدمت الفوتون كمتمم للموجة الكهرومغنطيسية ، لتضفى على الجسيمات خواصاً موجية ؟ أو هل يوجد ما يماثل الخاصية الثنائية الجسيمية الموجية للضوء فى نظرية الجسيمات ؟

لعله، يكون من الممكن إقامة هذا التماثل، إذا بدأنا بالعلاقة الأساسية التالية:

$$\text{كمية التحرك} = \frac{\text{الطاقة}}{\text{السرعة}} = \frac{\gamma h}{\text{ع}} = \frac{}{\lambda}$$

التى تربط الموجة أى ع بالخواص الجسيمية (كمية التحرك) لكمة الضوء، فقد اقترح « دى برولى » علاقة مشابهة لتطبيقها فى حالة الجسيمات:

$$\text{كمية التحرك} = \text{ك ع} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\text{أو} \quad \lambda = \frac{h}{\text{ك ع}}$$

حيث ك هى كتلة الجسيم و ع سرعته و λ طول موجة « دى برولى » للجسيم.

ومن المفيد أن نحسب طول الموجة من هذه المعادلة. فكلما ازدادت كتلة الجسيم أو سرعته قصر طول الموجة المصاحبة له. فلنفرض إلكترونا طاقته ١٠٠٠ إلكترون فولط (راجع الفقرة ١٧ – ١٠) فتكون سرعته ١,٨٨ × ١٠^{٩}سم / ثانية، ونعلم أن كتلته ٩,١ × ١٠$^{-٢٨}$، h = ٦,٦ × ١٠$^{-٢٧}$ إرج . ثانية.

$$\therefore \lambda = \frac{٦,٦ \times ١٠^{-}}{٩,١ \times ١٠^{-٢٨} \times ١,٨٨ \times ١٠^{٩}} = ٠,٣٨ \times ١٠^{-٨}\text{سم} = ٠,٣٨ \text{ ا}^{\circ}$$

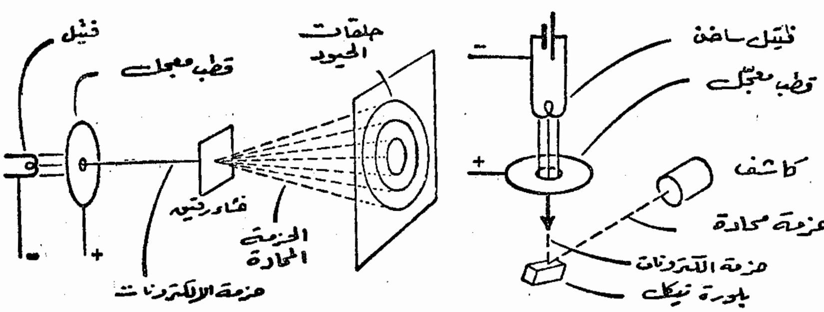
وهى قيمة تقع فى حدود الأشعة السينية القصيرة الموجة. أما إذا كانت طاقة الإلكترونات ١٠٠ إلكترون فولط فإن λ = ١,٢ ا$^{\circ}$. ومن خبرتنا فى حيود الأشعة السينية نجد أن أطوال الموجات هذه تقع فى حدود معقولة بحيث يمكن قياسها والتحقق من رأى « دى برولى »، فإما الإثبات وإما الإنكار. والأمر المدهش أن الإثبات جاء نتيجة لعمل « دافيسون وجيرمر » فى أمريكا وتبعهما « ج . ب طومسن » فى إنجلترا.

٢٤ – ٤ تجربة « دافيسون وجيرمر »:

استخدم « دافيسون وجيرمر » هذه الفكرة .. التى أثبتت أن الضوء عبارة عن حركة موجية لإثبات وجود موجات مادية تصحب الجسيمات عمليًّا، وكانت تلك

الظاهرة هى التداخل . فلقد رأينا (راجع البند ٢٢ — ٥) أن تداخل الأشعة بوساطة البلورات أو محزوز الحيود كان الدليل الذى أقيم لإثبات طبيعتها الموجية . وحيث أن طول موجة « دى برولى » للإلكترون ذى الطاقة العادية يقع فى حدود أنجستروم واحد أو أقصر ، فإن البلورة (التى تكون فيها المسافات بين الذرات حوالى ١ $\overset{\circ}{A}$) يجب أن تحدث تداخلا للإلكترونات .

وترى فى شكل ٢٤ — ٣ رسماً توضيحياً للتجربة ، فيقوم التصفيف المنظم لذرات النيكل فى البلورة بالدور نفسه الذى تقوم به الفتحات فى محزوز الحيود ، ويتركب



(شكل ٢٤ — ٤) (شكل ٢٤ — ٣)

المجمع من أسطوانة جوفاء تتلقى الإلكترونات المشتتة ، ويستخدم جلفانومتر فى قياس تيار الإلكترونات التى يتلقاها المجمع ، الذى يمكن تحريكه يميناً ويساراً ، ويتخذ مساره فى هذه الحركة شكل قوس دائرى . وبإجراء هذه التجربة تم الحصول على نموذج شبيه بنموذج حيود الضوء . وبمعرفة المسافات بين الذرات فى البلورة (ف فى حالة محزوز الحيود الضوئى) وزاوية الحيود . تمكن « دافيسون وجيرمر » من حساب طول موجة الإلكترون . وعينت كمية تحرك الإلكترون بمعرفة الجهد المستخدم فى تزويده بالعجلة ، ثم عوضت فى معادلة « دى برولى » النظرية . وجاءت النتيجة العملية متفقة مع طول الموجة الذى تنبأت به العلاقة النظرية . فللألكترون موجة تصحبه يمكن قياسها عملياً .

على أن « ج . ب . طومسن » استخدم طريقة مختلفة عن السابقة (شكل ٢٤ — ٤) ، وفى هذه التجربة جعل حزمة من الإلكترونات تسقط على غشاء رقيق من المعدن وتنفذ خلاله حيث يتلقاها لوح فوتوغرافى ، ويبين شكل ٢٤ — ٤ رسماً

توضيحيًّا للجهاز والنموذج الذى حصل عليه « طومسون » . ولقد أيدت قياسات « طومسون » لطول الموجة بالمثل تنبؤات « دى برولى » . فالجسيمات ــ أى الإلكترونات ــ يمكنها أن تتداخل كالضوء تماما . إذن هناك تماثل فى الخاصية الثنائية ، فكل من موجات الضوء والجسيمات المادية تسلك سلوك الموجات والجسيمات فى آن واحد ، ويلخص الجدول التالى نتائج الخاصية الثنائية الموجية الجسيمية لموجات الضوء والجسيمات الذرية .

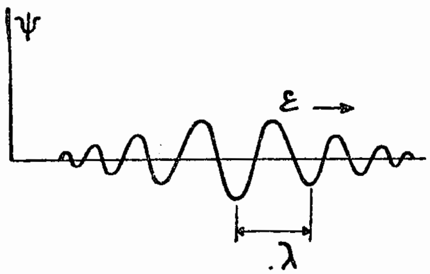
	موجات الضوء	الجسيمات
الطاقة	$h\,\gamma$	$\frac{1}{٢}$ ك ع^{٢}
كمية التحرك	$\frac{h\,\gamma}{ع}$	ك ع
طول الموجة	$\frac{ع}{\gamma}$	$\frac{h}{ك\,ع}$

٢٤ ــ ٥ تفسير الموجات الجسيمية :

تحتوى معادلة « دى برولى » $\lambda = \frac{h}{ع}$ على مزيج من الخواص الموجية λ ، وخواص الجسيمات ، كـ ع ، والعلامة الكمية التى لا مفر منها h . وإذا كانت ع هى سرعة الجسيم كما تشير بذلك التجربة ، فماذا تكون إذن سرعة الموجة ؟ قد نجيب على ذلك ، بالطبع ، إنه حيث أن الموجة تصحب الجسيم فيجب أن تحفظ الخطى معه أى يجب أن تكون ع هى سرعة الموجة أيضا . لكن الموجات العادية لا تحمل نفسها من مكان إلى آخر ، فهى اضطرابات متصلة تتغير دوريا بالنسبة للفضاء والزمن ، لكنه من الصعب أن يلائم الاضطراب المتصل الذى يملأ الفضاء ، نموذج الجسيم ، إذ أنه غير محدد فى مكان ، كما يجب أن يكون عليه الجسيم . كيف لنا إذن ، أن نحدد الموجة فى مكان ؟

تعالج الاضطرابات الموجية المحددة المكان مثل ومضات الضوء أو نفخات الصفارة ، تعالج هذه الاضطرابات فى نظريات الضوء والصوت ، بتطبيق قاعدة

التداخل، على مجموعة من الموجات المختلفة الأطوال . فنخصص لنفخة الصفارة مجموعة من الموجات الصوتية المتعددة الأطوال ، وتتراوح أطوال هذه الموجات حول متوسط معين وليكن λ. مثلا ، وننشئ نموذج تداخل للمجموعة بالطريقة المعتادة فى ظاهرة التداخل . على أن نموذج التداخل فى هذه الحالة ليس ثابتا فى الفضاء ولكنه يتقدم فى اتجاه انتشار الموجة ، كنبضة أو كعلبة موجية ، للنهايات العظمى للتداخل . أو بمعنى آخر ، تكون النهايات العظمى للتداخل عند أى لحظة مثل تلك التى يتضمنها النموذج الثابت ، ولكن وجود التغير فى أطوال الموجات يجعل النهايات العظمى تتحرك فى اتجاه الموجة . ونرى هذه العلبة الموجية موضحة فى شكل ٢٤ — ٥ حيث تتحرك إلى اليمين بسرعة ع ٢ ، حيث λ. هى متوسط طول الموجة فى العلبة . أما خارج العلبة فالتداخل هدام تماما سواء إلى اليمين أو اليسار .



(شكل ٢٤ — ٥)

والآن لنستعن بهذا النموذج لوصف الجسيمات الذرية كعلبة موجية . فسرعة الجسيم هى سرعة العلبة الموجية وطول موجة « دى برولى » هو أحد أطوال الموجات التى تحتويها العلبة الموجية . إنما أى طول موجة منها ، فهذا هو ما زلنا حتى الآن غير قادرين على معرفته ، والسبب فى ذلك هو التعقيد التالى . .

فالموجات الضوئية المتعددة الأطوال تسرى فى الأوساط العادية بسرعات متساوية ، وكذلك الحال بالنسبة لموجات الصوت . وعلى ذلك فسرعة النبضة تساوى سرعة الموجة العادية ، ولكن تتوقف λ فى معادلة «دى برولى» بشكل قوى على سرعة النبضة ع وكذلك على سرعة الموجة العادية ، وهناك انتشار فى كل من λ والسرعات الموجية العادية فى النبضة ، ولا توجد أى صلة مضبوطة بين طول موجة خاص فى النبضة وبين سرعتها . ونموذج العلبة الموجية يتصف بالتناثر الناشئ عن طبيعته ، ولا يوجد طول موجة خاص يصف العلبة الموجية ، بل هناك مدى من أطوال

الموجات ، كما لا توجد سرعة جسيمية خاصة لأى طول موجة معين ، إذ أن هذه السرعة تتوقف على مجموعة أطوال الموجات بأكملها التى تتكون منها النبضة .

وبالمقابلة بتاريخ الفيزياء الكلاسيكية تبدو هذه التصورات على أنها عيب فى نموذج العلبة الموجية ، ولكن ليس العيب فى النموذج كما سنرى فيا بعد ، بل هناك عدم تحديد أساسى فى الفيزياء الذرية ، ويعتبر هذا النموذج أحد أمثلته .

٢٤ ـ ٦ قاعدة اللاتحديد :

بين « هيزنبرج » فى عام ١٩٢٧ ، أن هناك لاتحديداً أساسياً فى الفيزياء الذرية ناتجاً عن القياس نفسه ، وهو نوع من الحدود الأساسية للدقة التى يمكن أن توصف بها العمليات الذرية ، وتنص هذه القاعدة فى إحدى صورها على :

« **تدفع عملية القياسات المجموعة الذرية إلى حالة خاصة تقل فيها الدقة فى تحديد الموضع كلما ازدادت الدقة فى قياس السرعة ، وتقل الدقة فى تعيين السرعة كلما ازدادت الدقة فى تحديد الموضع** »

وحاصل ضرب هذين الخطأين الناشئين عن طبيعة القياس هو :

$$\triangle \text{س} \times \triangle \text{ع} = \frac{h}{\text{ك}}$$

حيث △ س ، △ ع هى حدود الخطأ فى الموضع والسرعة .

وهذا الخطأ ناشئ عن طبيعة نموذج العلبة الموجية للجسيم . لنأخذ مثلا علبة موجية متحركة لإلكترون طليق مكونة من مجموعة من الموجات المتصلة المضافة إلى بعضها لتكون نهاية تداخل عظمى (الإلكترون) ، وأنها تحمل كتلة الإلكترون وشحنته بكيفية ما ، ولنفرض أننا نريد تحديد موضعها بدقة عالية . . أى نريد أن نجعل العلبة أقصر مما هى عليه . فيجب علينا أن نضيف موجات أكثر للعلبة ، وحيث إننا نعلم أن المركبات الموجية يجب أن تكون أطوالها مختلفة لكى تكوّن العلبة ، فمن الواضح أنه سوف يكون هناك انتشار فى أطوال الموجات فى العلبة ، وهذا يعنى انتشار فى السرعات إذ أن كل طول موجة له سرعة تختلف عن الأخرى طبقاً لمعادلة « دى برولى » . أضف إلى ذلك ، أنه كلما ازداد تحديد حيز العلبة

ازداد الانتشار فى السرعات ، حتى إذا وصلنا إلى الدقة التامة فى تحديد الموضع انتشرت السرعات بحيث تشمل جميع القيم . وعلى ذلك ، فالمعرفة التامة بالموضع س تهدم كل المعرفة بالسرعة ع . . أى أنه عندما تكون △س = صفر تكون △ ع = ∞. والآن، وقد فشلنا فى تحديد الموضع إلا على حساب اللاتحديد فى السرعة ، فلنحاول العكس إذ تخلص العلبة الموجية من الكثير من الموجات ، بل نتمادى فى عدد الموجات التى نتخلص منها حتى نصل إلى معرفة سرعة الموجة بأعلى درجة من الدقة ، ولكن فى هذه الحالة تكون العلبة قد انتشرت فى الوقت نفسه حتى تملأ كل الفضاء أى أنه إذا كانت △ ع = صفر ، تصبح △ س = ∞ . لقد وصلنا فى هاتين الحالتين إلى التطرف ، على أننا سوف نرى أن القيمة العامة للمقدار $\frac{h}{ك}$ فى قاعدة اللاتحديد يمكن استنتاجها بسهولة من نموذج العلبة الموجية . فالانتشار △ س فى الموضع يتطلب انتشاراً فى أطوال الموجات △ λ بالمقدار نفسه ، وهذا يعنى طبقا لمعادلة « دى برولى » انتشارا فى السرعة يقع فى حدود $\frac{h}{ك \triangle س}$ ،

وبذلك تصبح △ع = $\frac{h}{ك \triangle س}$ ، أو △ س . △ ع = $\frac{h}{ك}$

ومن ذلك نرى أن رصد القياسات قد يعمل على زيادة الدقة والتأكيد فى الشئ المرصود فى المجموعة الذرية ، ولكنه فى هذه العملية يتسبب فى إحداث لا تحديد وخطأ فى شيء آخر يمكن رصده .

٢٤ ــ ٧ تصوير « هيزنبرج » لقاعدة اللاتحديد :

كان واضحا لدينا كل الوضوح ، أثناء معاملتنا للإلكترون كعلبة موجية ، وبيان أن قاعدة اللاتحديد أمر يمكن التصديق به ، ماذا نعنى بتحديد موضع الإلكترون أو سرعته . فكانت القياسات أمراً مفهوماً ضمنيًّا ، ولكننا لم نذكر شيئا عن طبيعة تلك القياسات . وهذا أمر هام ، إذ أن قاعدة اللاتحديد جاءت نتيجة لعملية القياس نفسها . وعلى ذلك يجدر بنا أن نسوق مثالا معينا لذلك .

سوف نتصور تجربة وهمية . ومضمون هذه التجربة بسيط ، فنحن نريد أن نقيس « حالة » إلكترون ، ونعنى بذلك موضعه وسرعته ، وحيث أن التجربة وهمية ، فسوف نستخدم ميكروسكوبا عملاقاً وهمياً يمكنه تكبير الإلكترون إلى حجم يمكن رؤيته ، على أن الضوء الذى يستخدم لإضاءة الإلكترون يجب أن يكون طول موجته قريبا من أبعاد الإلكترون ، إذ أن الضوء ذا الطول الموجى الأكبر من الإلكترون لا ينعكس منه بشكل ملموس ، وعلى ذلك يفشل فى الإخبار بوجوده ، وبالرغم من أننا لسنا على يقين ، على الإطلاق ، من قطر الإلكترون (أو حتى من أن لهذا القطر قيمة موحدة لجميع الإلكترونات) ، إلا أنه يمكننا أن نخمن قيمته بألا تزيد على قيمة قطر الذرة ، إذ أن الإلكترون جزء من تركيب الذرة . وهذا يعنى أن مصدر الضوء يجب أن يعطى ضوءا بطول موجة الأشعة السينية أو حتى أقصر من ذلك . وبالتأكيد ، تكون الصورة فى الميكروسكوب أكثر وضوحا كلما صغر طول الموجة . وتزداد درجة الدقة التى يمكننا أن نعين بها موضع الإلكترون ، ولكن قد تبين لنا من تأثير « كومتن » أن فوتونات الأشعة السينية سوف تنقل كمية تحرك إلى الإلكترون ، الذى سوف يغير حركته الأصلية بمقدار لا يمكن التنبؤ به . وعلى ذلك فالجهد الذى نبذله فى الحصول على موضع الإلكترون بدرجة عالية من الدقة ، يحرمنا من إمكان معرفة حركته أى سرعته بالدقة . وإذا قللنا الخطأ فى السرعة باستخدام فوتونات أقل طاقة ، فإن الصورة تصبح أقل تحديدا ووضوحاً ، الأمر الذى يتسبب عنه دقة أقل فى تعيين الموضع . والحكم بفشل التعيين الدقيق للمقيسات ، حتى فى التجربة الوهمية ، هو فحوى قاعدة « هيزنبرج » للاتحديد ، وطبيعى أن الفشل ناشئ عن ضرورة إضاءة الإلكترون . . أى أنه لابد من إحداث اضطراب فى الإلكترون أثناء محاولتنا قياس موضعه وحركته ، وعلى أحسن الأحوال ، لقد قمنا بقياس حالة إلكترون يتفاعل مع الفوتونات . ولا زالت معرفتنا بحالة الإلكترون نفسها محدودة .

مثال : لعل الانتقال بقاعدة للاتحديد إلى عالم الديناميكا العادية جدير بأن يبحث ، إذ أن القاعدة كانت قد فسرت بغير عناية على أنها تهدم كل القياسات والخبرة الفيزياتية . فيمكن اعتبار القذيفة على أنها جسيم أبعاده ١ سم مثلا ، وكتلتها

١٠ جرامات وسرعتها ١٠٠٠ قدم / ثانية = ٣ × ١٠^{٤}سم / ثانية ، فلو فرضنا أننا نقيس سرعتها فى حدود خطأ ١ فى ١٠^{٤} أى أن △ ع = ٣ سم / ثانية ، فإن الخطأ أو اللاتحديد فى الموضع يصبح :

$$\triangle \text{س} = \frac{h}{\text{ك} \triangle \text{ع}} = \frac{٦,٦ \times ١٠^{-٢٧}}{١٠ \times ٣} = ٢ \times ١٠^{-٢٨}\text{سم}$$

وهذه كمية لا يمكن قياسها على الإطلاق . فواضح ، إذن ، أن قاعدة اللاتحديد لا تلعب أى دور ذى أهمية عملية فى ديناميكا الأجسام الكبيرة . ولا يمكن لأى تعميم من هذه الديناميكا أن يثبت أو يدحض صحتها .

٢٤ ـ ٨ الموجات الجسيمية ونظرية الاحتمال :

قد رأينا أن تحديد مكان الجسيم داخل علبته الموجية يعانى افتقارا إلى الدقة بالمقارنة بالأمثلة الكلاسيكية . ولهذا السبب أدخلت فكرة الاحتمال لوصف ما يمكن أن نعرفه عن هذا الجسيم بكل الدقة الممكنة ، ويستنتج هذا الاحتمال لموضع الجسيم فى العادة على النحو التالى .

نعلم من النظرية الموجية العادية ، أن شدة الموجة تساوى مربع سعتها ، وإذا كانت الشدة تعنى شيئا بالنسبة للموجة الجسيمية ، فيجب أن ترتبط بالسعة بهذه العلاقة نفسها . ويتم التشابه بين الحالتين إذا اعتبرنا احتمال وجود الجسيم فى مدى معين من المسافة س مساويا شدة الموجة الجسيمية فى هذا المدى . فلنفرض مثلا أن سعة موجة الإلكترون الطليق (شكل ٢٤ ــ ٥) هى ψ (بساى) وأنها تساوى ψ فى المدى الواقع بين س ، س + △ س ، فيكون حاصل الضرب ψ^{2} △ س هو احتمال وجود الإلكترون فى هذا المدى ، هذا بشرط أن تكون س قد ضربت فى مقدار ثابت مناسب ليجعل مجموع ψ^{2} △ س لجميع قيم س مساويا الوحدة . . أى أن الاحتمال الشكلى لوجود الإلكترون هو الوحدة أو ١٠٠ ٪ . وإذا تكلمنا بدلالة شدة الموجة ψ^{2} فإن دراستنا للعلبة الموجية للجسيم الطليق تخبرنا أن مجموع ψ^{2} △ س لجميع قيم س تساوى الوحدة للعلبة القصيرة (المحددة الموضع

تحديداً جيداً) ، وفى هذه الحالة تكون ψ كبيرة فى مدى صغير من س فقط ، أما فى حالة العلبة الطويلة (المحددة السرعة تحديداً جيداً) ، فإنها تكون أصغر منها فى الحالة السابقة ، لكنها تمتد فى مدى من س أكبر منه فى الحالة السابقة .

وإذا تكلمنا بدلالة شدة الموجة ψ ، فإن تجربة « طومسن » (شكل ٢٤ — ٤) تبين أن احتمال مشاهدة الإلكترون على نصف قطر معين يتذبذب ، فيكون كبيراً عند الحلقات وصغيرا فيما بينها ، وهذا السلوك جاء نتيجة لحيود الموجات الإلكترونية .

٢٤ ــ ٩ الموجات الإلكترونية فى الذرات :

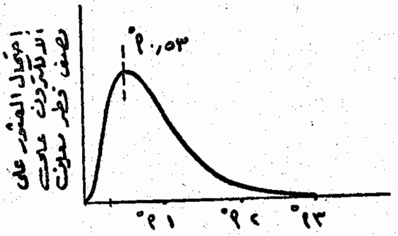
لا يقتصر مصاحبة الموجات للجسيمات على الإلكترون الطليق وعلبته الموجية ، ولكنها يمكن أن تمتد لتشمل الإلكترونات المتحركة فى المجالات المغنطيسية والكهربية . ولقد كان « شرودنجر » أول من قام بهذا النوع من التطبيق عام ١٩٢٦ ، حيث ابتكر المعادلة الموجية للإلكترون المنفرد المتحرك فى المجال الكهربى للنواة (ذرة الإيدروجين) ، وحل المعادلة ليحصل على سعات الموجة والطاقات الكمية للذرة . وكان عمله هذا هو بداية النظرية الحديثة المعروفة بالميكانيكا الموجية ، ومنذ ذلك الحين والميكانيكا الموجية تتطور تطوراً سريعاً حتى وصلت الآن إلى مرحلة بحيث لا توجد معها مسألة ذرية لا يمكن حلها بطرق الميكانيكا الموجية ، من ناحية المبدأ . والقيود الوحيدة هى التعقيدات الرياضية التى تضطرنا إلى استخدام الطرق التقريبية لحل المعادلات ، وعلى الرغم من أننا لا يمكننا الاستطراد فى دراسة طرق ميكانيكا « شرودنجر » الكمية واختبارها ، إلا أنه من المفيد أن نرى الصورة التى تتخذها موجات الإلكترون فى المجال النووى . فإذا فكرنا فى الحالات الساكنة لذرة الإيدروجين على أنها ناشئة عن تداخل الموجات ، فيجب أن يوجد عدد صحيح من أطوال موجات « دى برولى » فى كل حالة ساكنة ، وهذه الموجات منثنية حول « مدار » دائرى نصف قطره نق ، بحيث يكون :

$$\text{محيط المدار} = ٢ \pi \text{ نق} = \text{ن} \, h = \text{ن} \, \frac{h}{\text{ك ع}}$$

$$\therefore \quad ٢ \, \pi \, \text{ك ع نق} = \text{ن} \, h$$

وهذا هو فرض « بوهر » « الكمى » لكمية التحرك الزاوية ، كما تعطيه الميكانيكا الموجية ، ويحتوى المدار ن = ١ على طول موجة واحد فقط ، ويحتوى المدار ن = ٢ على طولى موجة وهلم جرا .

وتبين هذه النظرة للحالات الساكنة للذرة مظهراً وصفياًّ لنظرية « شرودنجر » فقط . وعلينا أن نضمنها قاعدة اللاتحديد وبعض الاعتبارات الأخرى . وإذا ما فعلنا ذلك نجد أن طاقات ذرة الإيدروجين تتفق مع نظرية « بوهر » (كما أنها تتفق مع النتائج العملية) ، فكما نتوقع من قاعدة اللاتحديد ، لا تقتصر شدة الموجة على مجموعة من المدارات ، ويبين شكل ٢٤ — ٦ ، شدة الموجة محسوبة للحالة الصفرية لذرة الإيدروجين ، ومنه نرى أن شدة الموجة تصل إلى نهايتها العظمى (أى يصل احتمال وجود الإلكترون إلى نهايته العظمى) نق = ٠,٥٣ اْ وهذا هو نصف قطر مدار « بوهر » الأول تماما . على أن الاحتمال لا يصل إلى الصفر داخل هذا المدار أو خارجه ، فهناك لا تحديد فى موضع الإلكترون . ويمكننا القول بأن نظرية « بوهر » تعطى جوابا دقيقا إلى درجة أعلى من اللازم ، فالإلكترون لا يبقى فى مداره المحدد بنظرية « بوهر » إذ أن موجته « تتسرب » إلى كل من جانبى المدار .



(شكل ٢٤ — ٦)

ولا ينبغى علينا أن ندعى ، طبقا للمناقشات السابقة ، أنه لا يتوافر اليقين فى المقياس الذرى ، فهذا بعيد عن الواقع ، فعندما نفحص كل مقدار مفروض للجسيم الذرى ، أو المجموعة الذرية نجد أن هناك أزواجا من هذه المقادير يمكن تحديدها تماما فى الوقت نفسه فى حين أنه توجد أزواج أخرى (مثل س ، ع) لا يتوافر لها هذا التحديد . فالترددات المضبوطة للخطوط الطيفية تدل بكل دقة ، على طاقات محددة فى الذرة (مستويات الطاقة) ، وعلى ذلك فمقادير الطاقة للذرة المشعة مقادير تامة التحديد ، فى حين أن موضع الإلكترون غير محدد . ومن ناحية أخرى لا يتوافر التحديد فى مقادير الطاقة بالنسبة للزمن ، فلا يمكننا معرفة اللحظة التى تشع فيها الذرة بالضبط .

٢٤ ـ ١٠ مقارنة بين الميكانيكا الموجية وميكانيكا « نيوتن » :

تعتبر المادة التى عالجناها فى الجزءين الأولين من هذا الكتاب ـ وهى ديناميكا الجسيمات والديناميكا الكهربية ـ جزءا من الفيزياء المعروفة غالبا بالفيزياء الكلاسيكية ، ويمكن وصفها ، فيما عدا تعديلات النسبية ، بفيزياء نيوتن ، إذ أنه تكرر استخدام قوانين « نيوتن » للحركة مرارا وبدون استثناء لوصف كل أنواع الحركة التى صادفناها (مثل الحركة الخطية والدائرية والدورية)، ولقد كان ضروريًّا أن نبحث فى طبيعة القوى التى تحدث هذه الحركات ، فدرسنا القوى الخطية والقوى المركزية « مثل القوى المركزية الجاذبية » والقوى الدورية، والقوى الكهربية ، والقوى المغنطيسية . ووجدنا أنه كان من الأفضل غالبا ، أن نصف تأثير بعض هذه القوى بدلالة مجالات ، مثل المجال المغنطيسى والمجال الكهربى إلخ . وكانت ذروة هذه الدراسة بلا شك ، هى نظرية المجال الكهرومغنطيسى للضوء التى وضعها « ماكسويل » ولقد أطلق الفلاسفة اسم « التحديد الميكانيكى » على الفلسفة التى كانت وراء فيزياء « نيوتن » (راجع البند ٩ ـ ١٠) وهذا يعنى أن العالم يتكون من مادة تتحرك وتتحكم فى سلوكها « قوانين » الطبيعة تحكماً صارماً . وأن ما يحد من التنبؤ بخصائص الطبيعة بدقة لا حدود لها ، هو تفكير الإنسان المقيد وتكنية القياس . ولكن نظرية الحركة للغازات كانت الضربة التى هددت هذا الإيمان بنظام الطبيعة المحكم ، إذ أننا ، طبقا لهذه النظرية ، يمكننا وصف الضغط الناتج عن الغاز بمعاملة عدد كبير من الجزيئات معاملة إحصائية دون أن نتعرض للجزىء المنفرد ، وتثير الطبيعة العشوائية للتصادمات بين الجزيئات الشك حول نظام حركتها المحدد . فسرعة الجزىء المعين عند أى لحظة معينة تبدو على أنها مسألة صدفة أكثر منها وليدة خطة .

وواصلت الميكانيكا الموجية الهجوم الذى شنته نظرية الحركة بقاعدتها للاتحديد، فالعالم الفيزيائى ليس مخططا لأدق التفصيلات ، وليس من الممكن التنبؤ بموضع الإلكترون بعد لحظة من الآن بالدقة ، لأننا لا نعرف موضعه أو سرعته الآن بالضبط وتمسكت مدرسة فلسفية بقاعدة « هيزنبرج » للاتحديد على أنها برهان فيزيائى للإرادة الحرة ، استمدوه من الحرية المقيدة التى تسمح بها قاعدة اللاتحديد للفعل

فى عالم الجسيمات غير الحية . أما ما إذا كان هذا الاستطراد من الجامد إلى الحى إجراء له ما يبرره ، فليس من شأننا إقراره فى مناقشتنا هذه .

ماذا يمكننا قوله عن الهجوم الذى شنته الميكانيكا الموجية على قوانين فيزياء « نيوتن » ونظرياتها ؟ فالكتلة الآن لها خواص موجية ، والطاقة لها قيم معينة فقط ، والضوء له تركيب حبيبى ، فهل ميكانيكا نيوتن خطأ ؟

تعطينا الميكانيكا الموجية ذاتها الإجابة عن السؤال . فميكانيكا نيوتن هى تقريب مقبول تماما فى فيزياء الأجسام الكبيرة ولا تتضح الأخطاء إلا فى التفاصيل الدقيقة للفيزياء الميكرونية . ولقد أوضح « دى برولى » أن عظم الهدم الذى أصاب الفيزياء الكلاسيكية راجع كلية ، إلى قيمة ثابت بلانك h. فلو كانت h متناهية فى الصغر ، لكانت كمة الطاقة متناهية فى الصغر أيضا ، ولكنا اعتبرنا — ونحن على صواب — أن الضوء انسياب مستمر . ومن ناحية أخرى لو كانت h كبيرة جداً لاستوقفت الطبيعة الكمية للضوء نظر أقل الفيزيائين انتباها وملاحظة ، ولم يكن هناك للجزءين « الكلاسيكى » و « الكمى » أى وجود فى علم الفيزياء ، وفى الواقع أن h بالطبع ، صغيرة جدا ، ولكنها ليست متناهية فى الصغر . ولقد استلزمت أدق التجارب وأبرعها فى هذا القرن للكشف عن تأثيراتها .

تمارين

١ — احسب كمية تحرك الفوتون الذى طول موجته ٥٠٠٠٠ أ° ، وكذلك الفوتون الذى طول موجته ٠,٥ أ° .

الجواب : ١,٣٢ × ١٠$^{-٢٢}$ ، ١,٣٢ × ١٠$^{-١٨}$ جم سم /ثانية

٢ — ما هى كمية تحرك فوتون الأشعة السينية ذات الطاقة ٥٠٠٠٠ إلكترون فولط؟
الجواب : ٢,٦٧ × ١٠$^{-١٨}$ جم سم / ثانية

٣ — اكتب قانونى بقاء الطاقة وكمية التحرك لتصادم مرن مباشر بين فوتون والكترون ساكن .

٤ ـــ احسب طول موجة الأشعة السينية المشتتة بزاوية ٩٠° من تصادم فوتون الأشعة السينية الذى طول موجته ١,٠ انجشترو م بإلكترون بتطبيق تأثير « كومتن » .

الجواب : ١٢٤,٠ أ°

٥ ـــ اثبت أن طول موجة « دى برولى » لجسيم كلاسيكى كتلته (ك) وطاقته (ط) وبالمعادلة $\lambda = \frac{h}{\sqrt{٢ ك ط}}$

٦ ـــ احسب طول موجة « دى برولى » لإلكترون يتحرك بسرعة ٣×١٠^{٩} سم/ ثانية (انظر الجدول ٢٠ ـــ ١)

الجواب : ٢٤٢,٠ أ°

٧ ـــ احسب طول موجة « دى برولى » للنيوترون (ل = $١,٦٧ \times ١٠^{-٢٤}$ جم) الذى طاقته إلكترون فولت واحد

الجواب : ٢٨٦,٠ أ°

٨ ـــ اثبت أنه إذا كان الخطأ فى تحديد موقع جسيم يساوى طول موجته ، فإن الخطأ فى سرعة الجسيم يساوى متوسط السرعة . . أى أن الخطأ فى قياس السرعة يساوى ١٠٠٪

مراجع مقترحة للاطلاع :

Born, Max. The Restless Universe'', London Blackie & Son, 1935.

يحوى الباب الثالث مناقشة ممتازة لنظرية الكم والدور الذى يلعبه الاحتمال . وهو سهل القراءة .

De Broglie, L. "Matter & Light'' New York, W.W. Norton & Co., 1939.

كتاب شعبي كتب بأسلوب غير رياضى عن الميكانيكا الموجية وما تعنيه (ومن الصعب تحديد أجزاء خاصة فيه) .

Eddington, Sir Arthur, "The Nature of the Physical World'', New York, The Macmillan Co. 1933.

يحوى الباب العاشر فيه وصفا جذابا لما أسهم به كل من « شرونجر » و « هيزنبرج » .

Heitler, W. "Elementary Wave Mechanics'' Exford University Press 1945.

يلخص البابان الأول والثانى من هذا الكتاب أسس الميكانيكا الموجية وطبيعتها . وقد لا يمكن للقارئ العادي تتبع طريقته الرياضية ، ولكن الجزء الفيزيائى واضح كل الوضوح .

Jordan, P., "Physics of the 20th Century'', New York, Philosophical Library, 1944.

يعالج الباب الخامس المحتوى الفلسفى لميكانيكا الكم .

الفصل الخامس والعشرون

النشاط الإشعاعى الطبيعى

٢٥ ــ ١ الفيزياء النووية

تطورت الذرة ، من الناحية التاريخية ، ووفقاً للترتيب الذى قدم به هذا الكتاب ، من قذيفة فى نظرية الحركة إلى تركيب معقد من جسيمات ذرية هى النواة والإلكترونات ومعلوم لدينا الآن ، كتل وشحنات هذه التركيبات الذرية ، فهى توصف بالعدد الذرى (ذ) وعدد الكتلة (ا) ، وكذلك أصبحت من القواعد الراسخة ميكانيكا التركيب الذرى والاستقرار الديناميكى للموجات الإلكترونية فى المجال الكهربى للنواة ، والخاصية الكمية لطاقات الإلكترون ، وامتصاص الكمات وانبعاثها عندما يتغير نظام الإلكترون من حالة كمية إلى أخرى .

ولقد عالجنا ببساطة ، القليل فقط ، من تطبيقات الميكانيكا الجديدة . . وهى الميكانيكا الكمية « لشرودنجر » و « هيزنبرج » ، التى نجحت نجاحاً يدعو إلى الدهشة بدوالها الموجية وحالات الطاقة لا فى الشئون الذرية الداخلية الصرفةفحسب ، بل امتد نجاحها كذلك إلى الفيزياء الجزيئية والكيموية بأجمعها. ومن المؤكد أن الطبيعة الذرية أصبحت مفهومة فهماً جيداً فى الوقت الحاضر فى مملكة الفيزياء الميكرونية بأجمعها ، حيث تظهر الذرات ذات كيان مستقل ، ويظهر أن معظم التقدم المستقبل فى هذا المجال سوف يتناول تطبيقات الميكانيكا الموجية فى مسائل معينة .

لقد أصبح للذرة تركيبها وميكانيكيتها ، ولكن ماذا عن نواتها ، فهل لها تركيب هى الأخرى ؟ وما هى الجسيمات الأساسية فى هذه المرحلة الحاضرة من المعرفة الفيزيائية ؟ إن الإلكترون هو أحد تلك الجسيمات الأساسية طبقاً للصورة الحاضرة ، فهل هناك جسيمات أخرى ، وإذا كان الأمر كذلك ، فما هو الدور الذى تلعبه فى الفيزياء الميكرونية ؟

يوجد فى الطبيعة ، كما نعلم ، ٩٢ عنصراً كيمويا تتراوح أعدادها الذرية (الشحنة النووية مقيسة بوحدة شحنة الإلكترون ش) ما بين ١ ، ٩٢ ، وكتلها الذرية تكون أعداداً صحيحة إذا اتخذنا كتلة ذرة الأيدروجين كوحدة (أو إذا اتخذنا كتلة $١٦_٢$ = ١٦,٠٠) ، وهذه الكتل تتزايد تزايداً متناسباً مع الأعداد الذرية . وأغلب العناصر لها ــ كما رأينا من قبل ــ عدة نظائر ، مختلفة عن بعضها البعض فى الكتلة بمقدار وحدة كتلة أو أكثر . ونحن نذكر أن معظم كتلة الذرة (٩٩,٩٥ ٪ تقريباً) مركزة فى النواة ذاتها . فيبدو أن هذه الخواص المنتظمة توحى بأن النواة ذاتها تركيب من جسيمات ، كل منها وحدة كتلة مثلا ، وبعض هذه الجسيمات يحمل وحدة شحنة موجبة بالإضافة لكتلته .

وتكون المعلومات التجريبية والنظريات التى تختص بالتركيب الداخلى للنوى الذرية والعمليات الداخلية فيها ، علم الفيزياء النووية . وتسمى المركبات الابتدائية للنواة النكليونات ، ويسمى التقدم الحديث فى العلوم النووية التطبيقية والتكنولوجيا النووية فى بعض الأحيان « النكليونيكا Nucleonica » .

٢٥ ــ ٢ اكتشاف النشاط الإشعاعى الطبيعى

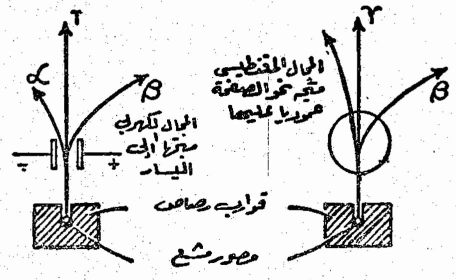
جاء الشاهد الأول على حدوث عمليات داخلية فى النوى عن طريق اكتشاف « هنرى بيكرل » للنشاط الإشعاعى الطبيعى عام ١٨٩٦ . ولقد كان هذا الاكتشاف معاصراً لبداية الفيزياء الذرية ، واكتشافات الأشعة السينية والإلكترون ، ولكن التقدم فيه كان أكثر تعقيداً ، وتشعباته كانت متعددة ــ كان « بيكرل » يجرى بعض التجارب على المركبات ذات الخاصية الفسفورية (المواد التى تمتص الضوء ، ثم تعيد إشعاعه بعد مدة) ، فكان يعرض هذه المركبات لضوء الشمس ويضعها قريبا من لوح فوتوغرافى ملفوف فى ورق أسود ، ليرى ما إذا كانت تبعث بأشعة نفاذة . وهذه الطريقة شبيهة جداً ، بالطريقة التى اتبعها « رونتجن » فى اكتشافه للأشعة السينية فى العام الذى سبق ذلك . وكان خام اليورانيوم أحد المركبات التى أجرى عليها « بيكرل » تجاربه ، فحصل على غشاوة كانت تصيب اللوح الفوتوغرافى

سواء تعرض المركب لضوء الشمس أو لم يتعرض . فاليورانيوم كان يبعث بأشعة دون الاستعانة بعامل خارجى ، وهذه الأشعة أمكنها النفاذ من عدة طبقات من الورق والتأثير فى اللوح الفوتوغرافى . ونحن نعلم الآن ، بالطبع ، أن الخاصية الفسفورية المتسببة عن الضوء لا تعطى الذرة الطاقة الكافية لإنتاج الأشعة السينية ، فالارتباط بين اكتشاف « بيكرل » وهذه الفسفرة الضوئية كان محض مصادفة . وكشف البحث الجدى فى السنوات القليلة ، التى تلت ذلك ، عن أن مركبات العناصر التى تأتى بعد الرصاص (ذ = ٨٢) فى الجدول الذرى ، لها خصائص إشعاعية مماثلة . أضف إلى ذلك أن تغيير المركب الكيموى للعنصر ليس له تأثير على هذه الخصائص ، وكذلك لم يمكن لتغيير درجة الحرارة ، أو الضغط ، أو التأثيرات الخارجية أن يحد من هذا التأثير . فكانت هذه الذرات تشع الطاقة باستمرار دون تأثر بالطريقة التى كانت تعامل بها . وسميت هذه الظاهرة بالنشاط الإشعاعى الطبيعى ، ولقد لاحظت مدام « كورى » وزوجها « بيير كورى » أثناء بحثهما فى النشاط الإشعاعى للعناصر أن خام البتشبلند ، وهو الخام الذى يستخلص منه اليورانيوم ، أظهر نشاطاً أكبر (أى أنه أحدث غشاوة فى اللوح الفوتوغرافى فى وقت أقصر) ، بحيث لا يمكن معه أن يفسر على أنه ناتج عما يحتويه من اليورانيوم . وفى الواقع ، لقد أصبح واضحاً ، بعد عملية الفصل الكيموى ، أن هناك شيئاً تخلف من البتشبلند ، له نشاط أكبر من اليورانيوم الذى استخلص من الخام نفسه . ونتج عن الفصل الكيموى الدقيق جداً ، لجميع المركبات فى البتشبلند عنصر مشع جديد أطلقت عليه مدام « كورى » اسم البولونيوم (ذ = ٨٤) ، تشرفاً بوطنها بولندا . على أن بعض منتجات عملية الفصل هذه ظلت تظهر نشاطا قوياً ، وبعد مجهود عنيف نجحت مدام « كورى » وزوجها فى عزل عنصر ثان جديد أطلقا عليه اسم الراديوم (ذ = ٨٨) وهو عنصر له نشاط إشعاعى خارق .

٢٥ ــ ٣ طبيعة الإشعاعات النووية

استلزم التفهم التام للنشاط الإشعاعى الطبيعى سلسلة طويلة ومعقدة من الأبحاث أسهم فى إجرائها فيزيائيون كثيرون ، فلقد أجريت تجارب متعددة على

الأشعة بدأت بتجارب «بيكوريل» نفسه . وفى عام ١٩٠٠ أصبح معروفاً أن هناك مركبات متعددة ، تختلف عن بعضها فى قدرتها على النفاذ فى المواد الجامدة ، ويمكن فصلها عن بعضها بالمجالات الكهربية والمغنطيسية ، وبلغ هذا العمل ذروته بتجارب « رذرفورد » عام ١٩١٣ ، التى بينت بوضوح أن هناك ثلاثة أنواع من الأشعة . ونجد



(شكل ٢٥ – ١)

اسم « رذرفورد » يلمع فى كشف المشتغلين بالنشاط الإشعاعى والفيزياء النووية الطويل ، لتجاربه الباهرة التى امتدت لفترة تربو على الثلاثين عاماً .

نرى فى شكل ٢٥ – ١ ، الأجزاء الضرورية للطرق التى اتبعها « رذرفورد » ، وغيره فى فصل الأنواع الثلاثة من أشعة النشاط الإشعاعى ، فكانت توضع كمية صغيرة من المادة المشعة (كان الراديوم والثوريوم أكثر المواد استخداماً) فى ثقب قالب من الرصاص ، وضع فوق مجال كهربى أو مغنطيسى ، فبينت المشاهدات أن هناك ثلاثة مركبات . . كان أحدها موجب الشحنة وأطلق عليه جسيمات ألفا (α) ، وكان الثانى سالبا وأطلق عليه جسيمات بيتا (β) ، أما الثالث فكان خاليا من الشحنة الكهربية وأطلق عليه أشعة جاما (γ) (لقد نشأ عن التعود على تسمية الأنواع الثلاثة باسم « أشعة » فى بادئ الأمر اصطلاح لا يزال مستخدماً على الرغم من الخطأ فى تطبيقه) . وأوحى وجود الشحنة بشكل قوى ، أن كلا من المركبات α ، β جسيمات ، فى حين أن أشعة جاما فوتونات ذات طاقة عالية .

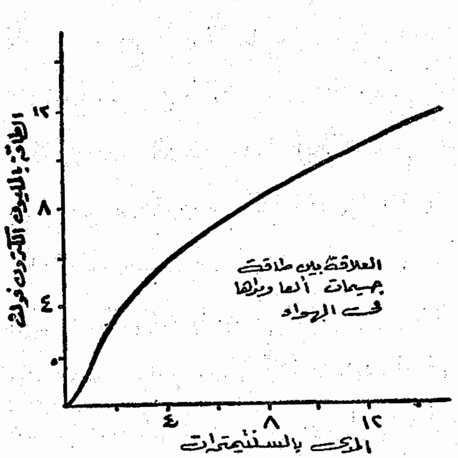
ولقد أثبتت طبيعة جسيمات بيتا بشكل قاطع ، بقياس النسبة بين الشحنة والكتلة باستخدام طريقة غير مباشرة لقياس الشحنة . فوجد أن جسيمات بيتا عبارة عن إلكترونات عالية الطاقة وقد تصل طاقتها إلى ٥ ملايين إلكترون فولت مثلا ، ووجد أن أشعة جاما تسلك سلوك الأشعة السينية العالية الطاقة ، ولقد حققت التجارب التى تبعت ذلك مطابقتها للفوتونات ذات الطاقة التى تمتد فيما بين ٠,١ ، ٣ ملايين

إلكترون فولت . وقيست النسبة بين الشحنة والكتلة لجسيمات ألفا باستخدام مجالين . . كهربى ومغنطيسى متعامدين؛ ووجد أنها هى النسبة المعروفة لنواة ذرة الهيليوم . أى أن شحنتها = + ٢ ش ، وكتلتها = ٤ وحدات كتلة ذرية . وقيست الشحنة بطريقة أخرى مستقلة ، وكان ذلك بقياس التيار الناشئ عن حزمة من جسيمات ألفا ، وعن عدد الجسيمات فى الحزمة . وبينت هذه التجارب أن جسيم ألفا عندما يتوقف فى الهواء يلتقط إلكترونين ، ويكون ذرة الهيليوم التى أمكن الكشف عنها من طيفها الخطى . ووجد أن طاقات جسيم ألفا تصل إلى ١٠ ملايين إلكترون فولت ، ولقد أجريت كل هذه التحقيقات فى العقد الأول من القرن الحالى .

٢٥ ــ ٤ القدرة على التأيين والمدى

من المشاهدات الأولى عن النشاط الإشعاعى قدرة الأشعة على تأيين الهواء المحيط بالمصدر المشع . . أى جعله موصلا . وتختلف هذه القدرة على التأيين من نوع إلى آخر من الأنواع الثلاثة للأشعة اختلافاً بيناً . وعلى ذلك فهى على قدر عظيم من الأهمية من الناحية التجريبية للتعرف إلى الأشعة المجهولة التكوين . فلندرس الآن هذه القدرة على التأيين ، وعلاقتها بامتصاص الأشعة .

لقد تأكد بالمشاهدة أن مدى جسيمات ألفا قصير ، فهو لا يزيد عن بضعة سنتيمترات فقط ، فى الهواء ، أو تلزم بضعة أجزاء من الألف من البوصة من رقيقة من الألومنيوم لتمنع مرورها تماماً ، ويظهر أنه من المعقول أن نستخلص أن استنفاد طاقة جسيم ألفا يرجع إلى التأيين . فعندما يشق هذا الجسيم الثقيل نسبيًّا ، الذى



(شكل ٢٥ – ٢)

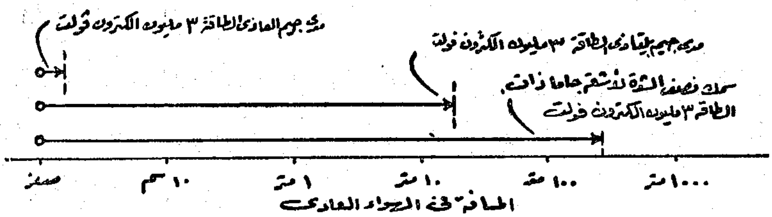
يحمل شحنتين موجبتين طريقه خلال المادة يزيح الإلكترونات الذرية من

طريقه محدثاً تأييناً كبيراً . ولقد وجد عمليًّا أن عملية التأيين الواحدة تكلف جسيم ألفا ، فى المتوسط ، ٣٠ إلكترون فولت من طاقته . وعلى ذلك فجسيم ألفا الذى طاقته ٣ ملايين إلكترون فولت ، (شكل ٢٥ — ٢) يحدث ١٠٠٠٠٠ أيون موجب قبل أن يأسر إلكترونين ، ويستقر كذرة هيليوم عادية ذات طاقة حرارية . أضف إلى ذلك ، أنه نظراً لقصر مدى جسيم ألفا (بضعة سنتيمترات فى الهواء) ، يكون التأين كثيفاً جدًّا ، ويحدد مسار جسيم ألفا بعشرات الألوف من الأيونات فى السنتيمتر الواحد . وتتغير هذه الكثافة الأيونية على طول المسار ، وتبلغ أقصى قيمة لها قرب نهاية المدى ، حيث تصل سرعة الجسيم إلى أقل قيمة لها .

ولقد شوهد ، فى البداية ، أن جسيمات ألفا المنبعثة من مادة مشعة معينة لها مدى محدد فى الوسط المادى ، وأنه من الممكن تحديد نهايات مساراتها تحديدا واضحاً . وتسمح لنا هذه الحقيقة بقياس طاقات جسيمات ألفا بدلالة مداها فى وسط معين ، وليكن الهواء مثلا ، ونرى فى شكل ٢٥ — ٢ المنحنى الذى يعطى العلاقة بين مدى جسيم ألفا وطاقته ، ولقد قيست الطاقات من انعطاف مسارها فى مجال مغنطيسى معلوم .

أما التأيين الناشئ عن جسيمات بيتا فأقل كثافة إلى حد كبير منه لجسيمات ألفا ، ويرجع ذلك لأسباب متعددة . فجسيم بيتا يحمل شحنة واحدة فقط ، وكتلته تقل عن جزء من الألف من كتلة جسيم ألفا ، حتى عندما تكون طاقته عالية جدًّا ، وتنقص هذه الكتلة كلما أبطأ الجسيم فى حركته . أضف إلى ذلك أن سرعته أعلى بكثير من سرعة جسيم ألفا المتحرك بنفس الطاقة . ولقد وجد عمليًّا أن جسيم بيتا يحدث فى السنتيمتر الواحد من مساره ، فى المتوسط ، حوالى $\frac{١}{١٠٠}$ من عدد الأيونات التى يحدثها جسيم ألفا (شكل ٢٥ — ٣) ، ومن ثم فمدى جسيم بيتا يبلغ مائة ضعف لمدى جسيم ألفا المساوى له فى الطاقة ، على أن مدى جسيم بيتا ليس محدداً تحديداً واضحاً ، ويرجع السبب فى ذلك أساساً ، إلى التشتت الكبير الذى يعانيه الجسيم نظرا لصغر كتلته ، وعلى ذلك فالعلاقات بين المدى والطاقة لا تجدى كثيراً فى تعيين الطاقة .

أما أشعة جاما ، فتأثيرها فى التأيين أقل من كل من جسيمات ألفا وبيتا ، ويبلغ تأثيرها حوالى $\frac{١}{١٠٠}$ من تأثير جسيم بيتا أو $\frac{١}{١٠٠٠٠}$ من تأثير جسيم ألفا على وجه التقريب ، ولا يمكن تحديد سمك المادة التى توقف أشعة جاما تماماً ، إذ أنها تمتص طبقا « لدالة لوغاريتمية » مثلها فى ذلك مثل جميع الفوتونات . ونعنى بالاصطلاح



(شكل ٢٥ — ٣)

الرياضى « الدالة اللوغاريتمية » ببساطة أنه إذا أنقص سمك معين من المادة شدة أشعة جاما إلى النصف (سمك نصف الشدة) ، فضعف هذا السمك ينقصها إلى الربع ، وثلاثة أمثاله ينقصها إلى الثمن وهلم جرّا . ولا يوجد ، من الناحية النظرية ، السمك الذى يمكن به إنقاص الأشعة إلى الصفر تماماً ، ولكن بضعة سنتيمترات من الرصاص ، أو بضع مئات من الأمتار من الهواء تكفى من الناحية العملية للتخلص من أشعة جاما بصورة فعالة . وهذا الامتصاص اللوغاريتمى هو نتيجة مباشرة لطبيعة فقد الطاقة من أشعة جاما . فأشعة جاما تختلف عن جسيمات بيتا فى أنها لا تفقد طاقتها بكميات صغيرة بصورة مستمرة ، ولكنها تتفاعل مع المادة بإحداث تأثير كهروضوئى أو تأثير « كومتن » حيث تعطى كل طاقتها أو الجزء الأعظم منها ، للإلكترون ، وعلى ذلك ، فإن امتصاص أشعة جاما يتحدد وفقاً لاحتمال حدوث تلك العمليات ولا يتغير بازدياد طول المسار ، فالحادثة الواحدة تستنفد عمليًّا فوتوناً واحداً من أشعة جاما . ويفسر سمك نصف الشدة فى امتصاص أشعة جاما على أنه طول المسار الذى يكون فيه احتمال استنفاذ فوتون أشعة جاما يساوى $\frac{١}{٢}$ ، وبمضاعفة هذا الطول يزداد الاحتمال إلى $\frac{١}{٢} + (\frac{١}{٢} \times \frac{١}{٢}) = \frac{٣}{٤}$ وهلم جرّا .

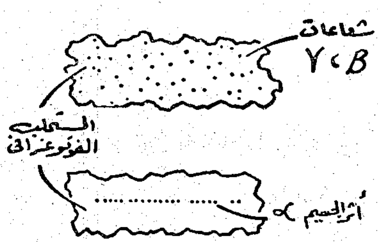
ويوضح لنا شكل ٢٥ — ٣ قدرات النفاذية النسبية فى الهواء العادى لجسيمات ألفا ، وبيتا ، وأشعة جاما ذات الطاقة « ٣ ملايين » إلكترون ڤولت .

٢٥ ــ ٥ طرق الكشف عن أشعة ألفا وبيتا وجاما

تعتمد جميع طرق الكشف عن جسيمات ألفا وبيتا وأشعة جاما ، على قدرتها على التأيين . وهناك خمس طرق ــ على الأقل ــ شائعة الاستعمال .

١ ــ اللوح الفوتوغرافى

لقد كانت الغشاوة التى أصابت المستحلب الفوتوغرافى هى السبب فى اكتشاف النشاط الإشعاعى . وإذا نظرنا إلى هذا المستحلب تحت مجهر قوى ، فإننا نرى أن أشعة بيتا وجاما تتسببان فى تكوين حبيبات بروميد الفضة بصورة مشتتة (شكل ٢٥ ــ ٤) . أما جسيمات ألفا ، فنظراً للتأين الكثيف الذى تحدثه ، فإنها تترك وراءها مساراً محدداً من الحبيبات التى تأثرت بمرورها ، ويمكن إظهارها فى المستحلب



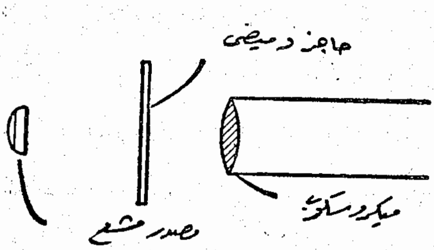
(شكل ٢٥ ــ ٤)

(شكل ٢٥ ــ ٤) ، وعلى ذلك فهذه الطريقة لا تكشف عن جسيمات ألفا فحسب ، بل إنه يمكن قياس مداها (فى المستحلب) كذلك . ولقد تم الحصول ، حديثاً جداً ، على مستحلبات فوتوغرافية خاصة قادرة على إظهار مسارات جسيمات بيتا ، وبذلك اتسع نطاق النفع بهذا الكشف البسيط .

٢ ــ الومضات

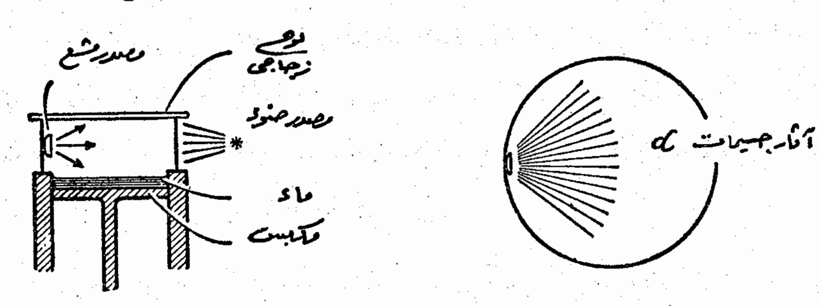
رأينا فيما سبق أن الحاجز الفلورى ، مثل كبريتيد الخارصين ، يوضح وجود أشعة الكاثود والأشعة السينية . ولما كانت كل من جسيمات بيتا وأشعة الكاثود عبارة عن إلكترونات ، وكل من أشعة جاما والأشعة السينية عبارة عن فوتونات ، فمن المنطق أن نتوقع أن يكشف الحاجز الفلورى عن كل من جسيمات بيتا وأشعة جاما . ولكن جسيمات بيتا وأشعة جاما المنبعثة من عينة مشعة عادية عددها ، لسوء الحظ ، أقل من أن يحدث تأثيراً يمكن رؤيته بسهولة فى حاجز فلورى رقيق .

على أنه قد تم حديثاً الحصول على بلورات عديمة اللون ذات سمك لا بأس به ، تبين أنها تصلح كوسط فعال لإحداث وميض من جسيمات بيتا وأشعة جاما ، وهى تستخدم الآن على نطاق واسع لهذا الغرض . أما جسيمات ألفا ، فإنه يمكن الكشف عن الجسيم المنفرد منها بصرياً باستخدام حاجز مغطى بكبريتيد الخارصين ، فإذا نظرنا إلى الحاجز من خلال عينية مكبرة نشاهد بريقاً ضوئياً فى مواقع محددة ، يسمى « ومضات » (شكل ٢٥ــ٥). والتأين



(شكل ٢٥ – ٥)

الكثيف جداً الذى يحدثه جسيم ألفا ينتج عنه تأثير مركز ، فبمشاهدة الومضات لا يمكننا أن نكشف عن وجود جسيمات ألفا فحسب ، بل يمكننا أيضا أن نعدها فعلا. ولكن هذه الطريقة صعبة إذ أنها تتطلب عينا لها القدرة على التكيف للظلام ، فضلا عن أنها تجهد الراصد بسرعة . على أن قدرا كبيرا من الأبحاث فى النشاط الإشعاعى فى أول عهده اعتمد على الكشف البصرى . ولقد رجعنا ثانية ، حديثاً ، إلى طريقة الوميض باستخدام خلايا كهروضوئية حساسة للكشف عن ومضات الضوء . وأصبحت العدادات الوميضية شائعة الاستعمال مرة أخرى فى المعامل النووية .



(شكل ٢٥ – ٦)

٣ ــ غرفة ولسن السحابية

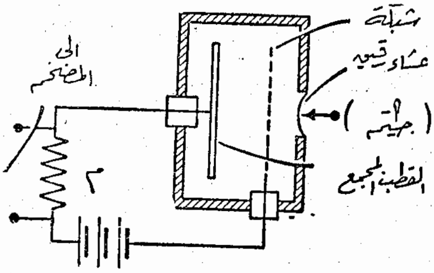
كان هذا الجهاز الباهر من اختراع « س . ت . ر . ولسن » عام ١٩١٢ ، ولا يزال يستخدم كأداة نافعة فى الأبحاث . ويتوقف عمله على الحقيقة المعروفة

بأن بخار الماء يميل إلى التكثف حول الأيونات (وهذا هو التفسير المحتمل لتكون السحب فى السماء) ، فإذا تشبع حيز محدد من الهواء ببخار الماء (والتشبع يحدث دائماً فى حالة وجود الماء) ، ثم برد الهواء فجأة ، فإنه يصبح فى حالة فوق التشبع أى أنه يحتوى لحظيا على قدر من بخار الماء يزيد على ما يمكنه الاحتفاظ به بصفة دائمة ، ويتكون ضباب من قطيرات الماء حول الأيونات فى الغرفة . وجسيم ألفا مثلا ، الذى يمر خلال هذا الجو فوق المتشبع يحدث مساراً من الأيونات التى تتكثف عليها قطيرات الماء . وبذلك يصبح المسار مرئيًّا . ونرى فى شكل ٢٥ — ٦ رسماالغرفة سحابية بسيطة . ونحصل على التبريد اللازم لإحداث حالة فوق التشبع بالسماح للغاز بالتمدد بسرعة ، وإذا عبر جسيم ألفا الغرفة قبل التمدد مباشرة ، فإنه يترك وراءه مسارا مرئيا . ويستخدم قطب مجمع ذو جهد موجب بالنسبة لسطح الماء للتخلص من الأيونات بعد التمدد ، وبذلك تصبح الغرفة على استعداد لاستقبال الجسيم التالى . ونرى فى شكل ٢٥ — ٦ ، رسماً توضيحيًّا لمسارات جسيمات ألفا . ولا يزودنا هذا الوصف بوسيلة نعرف بها اللحظة التى يدخل فيها الجسيم الغرفة ، وعلى ذلك ، فالإجراء المعتاد . . هو أن نحدث التمدد بصفة دورية (مرة أو أكثر كل دقيقة) ونمسك بما يمكن اصطياده . ويتم التمدد وتصوير المسارات تلقائيًّا . وقد يكون فى هذا الإجراء إسراف فى كل من الفيلم والوقت فى بعض التجارب ، وعلى ذلك تنظم العملية بأن يتحكم فى الغرفة كاشف إضافى يتسبب فى إحداث التمدد فى وقت مناسب للحاق بالمسار الأيونى ، ويغلب استخدام هذا النوع من الغرف السحابية ، التى ينظم عملها الكاشفات الإضافية فى أبحاث الأشعة الكونية ، حيث لا تأتى الجسيمات التى يهمنا أمرها إلا نادراً .

ويمكن لغرفة « ولسن » السحابية أن تظهر آثار كل من جسيمات ألفا وجسيمات بيتا ، أما أشعة جاما فيدل على أثرها الإلكترون الثانوى (الفوتونى أو إلكترون كومتن) الذى لا ينتج إلا نادراً فى بخار الغرفة . إلا أنه إذا سمح لأشعة جاما بالنفاذ خلال صفيحة معدنية فى أول الأمر ، يكثر عدد هذه الإلكترونات ، ومن ثم تنبئ بسهولة عن وجود أشعة جاما. وتيسر لنا تعيين طاقات الإلكترونات الثانوية وأشعة جاما .

٤ — غرفة التأيين

ربما تكون هذه الأداة أبسط أنواع أجهزة الكشف عن الجسيمات أساساً ، إذ ما هى إلا غرفة تحتوى على قطبين يستخدمان فى جمع الأيونات الناتجة عن مرور الجسيم السريع المشحون ، ويسمحان بقياس هذا التيار الأيونى كهربياً .



(شكل ٢٥ — ٧)

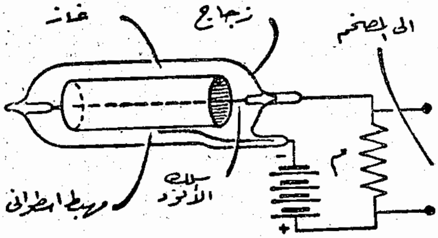
ونجد فى شكل ٢٥ — ٧ رسماً لغرفة تأين بسيطة للكشف عن جسيمات ألفا . فتنفذ الجسيمات من صفيحة معدنية رقيقة (هذه الصفيحة ضرورية لعزل غاز الغرفة عن الخارج وإكمال عزل الغرفة ذاتها كهربياً) . وتجد الأيونات ، التى تخلفها هذه الجسيمات وراءها ، نفسها فى مجال كهربى فتتحرك نحو الأقطاب حيث تسلم شحناتها . ويظهر تيار كهربى صغير للحظة صغيرة فى المقاومة م أثناء محاولة البطارية معادلة الشحنات المتجمعة . ويتسبب هذا التيار اللحظى فى وجود فرق جهد صغير عبر المقاومة م يتضخم إلكترونياً ، ويعمل على تشغيل أداة تسجيل . وعلى ذلك يحدث كل جسيم يدخل غرفة التأيين ، نبضة جهد أى « ركلة » ، وكلما ازداد التأيين الذى يحدثه الجسيم ، كبرت نبضة الجهد . ويمكن لغرفة التأيين ، مثلها فى ذلك مثل الغرفة السحابية ، أن تفرق بين كل من جسيمات ألفا وجسيمات بيتا كما يمكنها أيضاً تسجيل أشعة جاما عن طريق الإلكترونات الثانوية ، ولو أن النبضة الناتجة فى هذه الحالة تكون صغيرة . وهذا النوع من غرف التأيين يعد الجسيمات المؤينة .

وهناك طريقة أخرى لاستخدام غرفة التأيين (وهى الأسبق من الناحية التاريخية) ، وفيها تقيس الغرفة التأيين الكلى الناتج عن مجموعة من الجسيمات . وهذه الطريقة تشبه فى أساسها الطريقة السالفة ، إلا أن المقاومة م فى هذه الحالة تكون كبيرة بحيث تضمحل نبضات التيار فى وقت أطول ، فتتداخل النبضات الناتجة عن الجسيمات المتتابعة وتحدث تياراً متوسطا وفرق جهد متوسط عبر المقاومة م . ويستخدم إلكتروسكوب

متصل بالقطب المجمع المعزول لقياس هذا الفرق فى الجهد ، ومن ثم يقيس التيار الكهربى . وغالبا ما يستخدم هذا النوع من غرف التأيين فى قياس شدة أشعة جاما والأشعة السينية لأغراض الوقاية الصحية .

٥ — عداد « جيجر »

يعتبر عداد « جيجر » من أكثر كاشفات الجسيمات والفوتونات شيوعاً ، ولقد اخترعه « جيجر » عام ١٩٠٨ عندما كان يعمل فى معمل « رذرفورد » وأدخل عليه التحسينات آخرون كثيرون . ومزاياه هى شدة الحساسية ، والبساطة والمرونة فى الاستعمال وقوة الاحتمال . ويتركب فى أبسط أنواعه من أسطوانة مفتوحة الطرفين يمتد عند محورها سلك مشدود (شكل ٢٥ — ٨) ، ومحفوظة فى غلاف زجاجى يحتوى على غاز (يكون فى الغالب خليطا من الأرجون وبعض الغازات الأخرى أو الأبخرة) تحت ضغط يساوى حوالى $\frac{1}{5}$ الضغط الجوى . ويسلط فرق فى الجهد بين السلك والأسطوانة فى حدود ١٠٠٠ ڤولت بحيث يكون السلك موجباً بالنسبة للأسطوانة وتكون قيمة هذا الفرق فى الجهد كبيرة إلى درجة معينة ، بحيث تكون أقل قليلا من جهد الانهيار للغاز . وهو الجهد الذى يسبب توصيلا كهربيا فى الغاز (كما هى الحال فى أنبوبة التفريغ الكهربى فى الغازات) . فإذا دخلت جسيمات ألفا أو بيتا أو أشعة جاما فى العداد أنتجت أيونات فى المنطقة الكائنة بين السلك والأسطوانة ، وتتعجل الإلكترونات (وكذلك الأيونات الموجبة ، ولكن بدرجة أقل) التى تحرر من التأيين بسرعة ، إلى طاقات كبيرة كبراً كافيا ، لأن تنتج هذه الإلكترونات والأيونات الموجبة أيونات أخرى أثناء تحركها نحو القطبين . وتنتج الإلكترونات والأيونات الموجبة الجديدة أيونات أخرى وهلم جرًّا . ومن ثم ينشأ سيل منهمر من



(شكل ٢٥ — ٨)

الإلكترونات ، فى وقت قصير جداً يقل عن جزء من المليون من الثانية ، ويندفع نحو السلك الموجب . وتتكون شحنة فضاء كثيفة موجبة من الأيونات الموجبة حول السلك . وتتسبب حركة الإلكترونات والأيونات نحو القطبين فى إحداث نبضة جهد كبيرة عبر المقاومة الكبيرة م نتيجة للشحنات المستحثة على المهبط والسلك . وبمجرد أن تتجمع الشحنات بوساطة القطبين وتتعادل من البطارية يصبح عداد جيجر مهيأ مرة أخرى لاستقبال جسيم آخر ، فيتضح إذن ، أن عداد جيجر عبارة عن نوع « متدرج » من غرفة التأيين يستخدم فيه مجال كهربى أكبر مما يستخدم فى غرفة التأين ، وكذلك يكون التأين فيه تراكميا . وهو يعمل كغرفة تأين تماماً ، بكل تأكيد ، عند الجهود المنخفضة . وبازدياد الجهد يزداد التأين (ومن ثم نبضة الجهد) أيضاً حتى تحد شحنة الفضاء فى النهاية من استمرار الزيادة فى التأين . وفى هذه الحالة ينشأ عن أى جسيم يحدث أيوناً أصلياً سيل من الإلكترونات بالقدر نفسه . وعلى ذلك تتساوى النبضات الحادثة من جسيمات ألفا وبيتا وأشعة جاما . وبصفة عامة يحدث كل جسيم من جسيمات ألفا أو بيتا يدخل العداد لمدة واحدة . إلا أن الكشف عن أشعة جاما أقل احتمالا من الجسيمات المشحونة . وحيث إن نبضة الجهد الصادرة من عداد جيجر ثابتة القيمة سواء كان الجسيم ألفا أو بيتا أو أشعة جاما ، فلا يمكن للعداد أن يميز بينها . على أنه إذا كان الغلاف الزجاجى سميكاً سمكاً كافياً فلا تتمكن من اختراقه إلا جسيمات بيتا وأشعة جاما . فيلزم أن تكون الجدران أو نهاية العداد رقيقة للغاية للسماح لجسيمات ألفا أو جسيمات بيتا البطيئة بالنفاذ فيها ودخول العداد . وعدادات جيجر بسيطة الصنع وكذلك الدوائر الإلكترونية المصاحبة لها ، ويمكن أن تصنع خفيفة سهلة الحمل إذا لزم الأمر .

٢٥ ــ ٦ مصدر النشاط الإشعاعى

إن البرهان على أن نواة الذرة هى المصدر الذى تنبعث منه جسيمات ألفا وبيتا وأشعة جاما ساطع ومقنع ، وسوف نناقش كل نوع منها على انفراد :

أشعة جاما : تنشأ الأشعة السينية ذات أعلى طاقة ، عن انتقال إلكترون إلى أقرب المدارات الداخلية للنواة (خط الأشعة السينية الطيفى ك) ، ولقد تبين من

القياسات التى أجريت على الأشعة السينية ، أن هذا الانتقال ذا الأثر الأكبر يتضمن ، حتى فى حالة ذرة اليورانيوم التى تعتبر ذات أعلى عدد ذرى للعناصر المتوافرة فى الطبيعة ، ١١٥٠٠٠ إلكترون فولت فقط . ولكن وجد أن طاقة أشعة جاما تبلغ عشرة أضعاف أو عشرين ضعفاً لهذه الطاقة . فالتغيرات فى التركيب الخارجى للذرة ليست بالضخامة الكافية لأن تفسر انبعاث أشعة جاما منها . ومن المعقول أن نستنتج أن هذه الأشعة لابد أن تكون منبعثة من النواة .

جسيمات بيتا : حيث إن هذه الجسيمات إلكترونات ، فربما يظن أنها تتحرز من مدارات الذرة ، إلا أن دراسة التغيرات الكيموية التى تصاحب انبعاث أشعة بيتا تزودنا بأقوى الشواهد إقناعاً على أن جسيمات بيتا ذات أصل نووى لا ذرى . فواضح فى هذه التغيرات الكيموية أن العدد الذرى للنواة يزداد وحدة واحدة بانبعاث جسيم بيتا ، وعلى ذلك فلابد أن تكون النواة قد فقدت شحنة إلكترونية فى العملية .

جسيمات ألفا : وهذه الجسيمات عبارة عن نوى ذرات الهيليوم ، ونحن نعلم أنه لا يوجد إلا الإلكترونات فى التركيب الخارجى للذرة ، اللهم إلا إذا كانت تفسيراتنا السابقة لجميع الظواهر الذرية خاطئة . أضف إلى ذلك أن الشواهد الكيموية تدل على أن جسيم ألفا يجب أن يكون منبعثاً من النواة .

٢٥ ـ ٧ التفتت النووى التلقائى

حيث إن لجسيم ألفا شحنتين موجبتين ، وأربع وحدات كتلة ذرية ، فلابد أن تتغير شحنة النواة التى ينبعث منها الجسيم وكتلتها بهذين المقدارين . وكذلك تتغير خواصها الكيموية إذ أن العنصر يحتفظ بخواصه الكيموية ما دامت شحنته النووية لم تتغير . فالنواة التى تبعث بجسيم ألفا تتفتت إلى عنصر جديد ينخفض فيه العدد الذرى بمقدار وحدتين ، وتنخفض كتلته الذرية بمقدار أربع وحدات . وهذا يحدث تلقائياً من الطبيعة دون مساعدة الإنسان أو إعاقته . ويطلق على هذا التحول من عنصر إلى عنصر اصطلاح « تحول العناصر » . (ولقد كان ذلك هو حلم الكيمويين القدماء) ، وتحدث عملية التحول فى العناصر التى تأتى بعد الرصاص فى الجدول الدورى للعناصر .

ولقد وجد أن أنواعاً معينة من النوى تبعث بجسيمات ألفا وأن أنواعاً أخرى تبعث بجسيمات بيتا (هناك بضع نوى قليلة تبعث بجسيمات بيتا الموجبة أو السالبة ، وسوف نهمل الآن هذه الأيسوميرية) ولكن النواة الواحدة لا يمكن أن تبعث بجسيم ألفا وبيتا معا على الإطلاق .

باعثات ألفا : نأخذ نواة اليوارنيوم $_{٩٢}\text{يو}^{٢٣٨}$ كمثل ، فعندماينبعث منها جسيم ألفا يصبح عددها الذرى ٩٠ وكتلتها ٢٣٤ . وبنظرة إلى الجدول الدورى للعناصر يتضح لنا أن العنصر الذى عدده الذرى ٩٠ هو الثوريوم . وربما يكون مفيداً لنا لو اختصرنا وصف العملية بكتابة التفاعل على هذا النمط الذى نعبر به عن التفاعلات الكيموية :

$$_{٩٢}\text{يو}^{٢٣٨} \longrightarrow {}_{٢}\text{هى}^{٤} + {}_{٩٠}\text{ث}^{٢٣٤}$$

وهناك باعثات أخرى كثيرة لألفا ، فالراديوم مثلا ، يتحول إلى رادون (غاز) بانبعاث جسيم ألفا .

$$_{٨٨}\text{را}^{٢٢٦} \longrightarrow {}_{٢}\text{هى}^{٤} + {}_{٨٦}\text{رن}^{٢٢٢}$$

باعثات بيتا : عندما ينبعث إلكترون من النواة تزداد شحنتها بمقدار شحنة واحدة . أى أن العدد الذرى يزداد وحدة واحدة . إلا أن كتلة الإلكترون يمكن إهمالها بالنسبة للكتلة النووية ، بحيث لا يحدث تغيير فى عدد الكتلة الذرية . ولقد لوحظ أن الثوريوم $_{٩٠}\text{ث}^{٢٣٤}$ الناتج من $_{٩٢}\text{يو}^{٢٣٨}$ باعث لبيتا . فتزداد شحنة نواة الثوريوم وحدة واحدة وتصبح ٩١ وتظل الكتلة كما هى ٢٣٤ . والعنصر الذى عدده الذرى ٩١ هو البروتاكتينيوم . ولما كان رمز الإلكترون $_{-١}\text{ش}^{٠}$ وكتلته مهملة وعدده الذرى — ١ فيمكننا كتابة المعادلة كما يلى :

$$_{٩٠}\text{ث}^{٢٣٤} \longrightarrow {}_{-١}\text{ش}^{٠} + {}_{٩١}\text{برأكت}^{٢٣٤}$$

ولقد وجد أن البروتاكتينيوم باعث لبيتا أيضاً ، ويتحول ثانية إلى نظير لليورانيوم

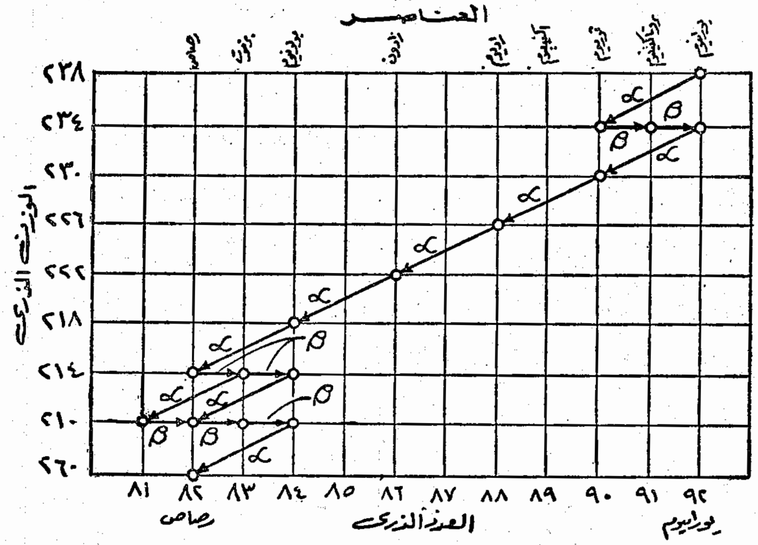
$$_{٩١}\text{برأكت}^{٢٣٤} \longrightarrow {}_{-١}\text{ش}^{٠} + {}_{٩٢}\text{يو}^{٢٣٤}$$

باعثات جاما : لا يغير انبعاث جاما العدد الذرى للنواة ولا كتلتها ، وعلى ذلك فلا ينشأ عنه أى تحول . وينشأ انبعاث جاما من حقيقة أن النواة التى تبعث بجسيم

ألفا أو جسيم بيتا تترك فى حالة مضطربة (تكون الطاقة فيها زائدة عما هى عليه فى الحالة الطبيعية) . فتتنازل النواة عن هذه الطاقة الفائضة بإشعاع أشعة جاما . وهذه العملية شبيهة بالانبعاث الكمى من الذرة . وإشعاع فوتون جاما يكون عادة مصاحبا لانبعاث جسيم بيتا ، وقد يصاحب انبعاث جسيم ألفا .

٢٥ ـ ٨ سلاسل التفتت الإشعاعى

ينتج عن انبعاث جسيم ألفا إزاحة للنواة الأصلية فى الجدول الدورى للعناصر موضعين نحو اليمين . أما انبعاث بيتا فيزيح العنصر موضعاً واحداً إلى اليسار . ولقد بين « رذرفورد » وعلماء آخرون ، أن الغلبة تكون فى النهاية لباعثات ألفا ، فتعانى سلسلة التحول بعض الانعطافات الشبيهة بأسنان المنشار حتى تنتهى فى النهاية إلى الرصاص . ولقد ظهر أيضا أن هذه السلاسل المعقدة تقع فى الواقع فى ثلاث مجموعات .. تبدأ إحداها باليورانيوم $_{٩٢}$يو^{٢٣٨} (وتسمى سلسلة اليورانيوم) . وتبدأ



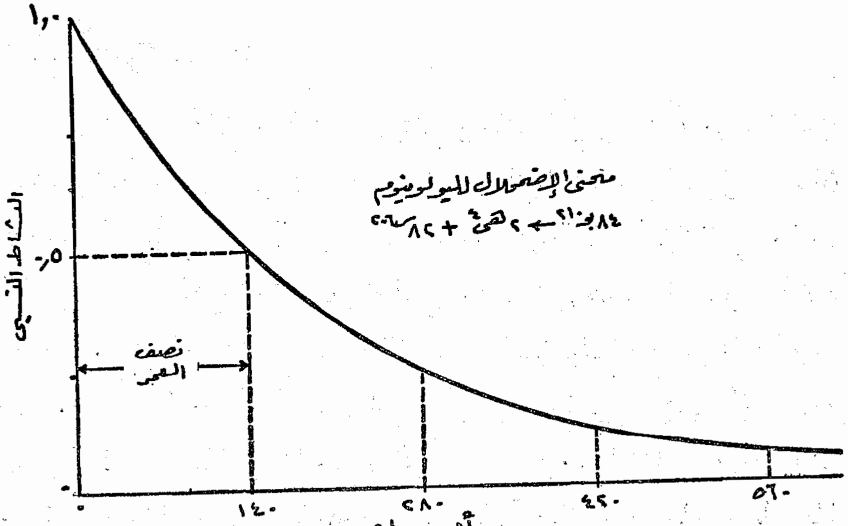
(شكل ٢٥ ـ ٩)

الثانية بالثوريوم $_{٩٠}$ث^{٢٣٢} (وتسمى سلسلة الثوريوم) وتبدأ الثالثة باليورانيوم $_{٩٢}$يو^{٢٣٥} (وتسمى سلسلة الأكتينيوم) . ونرى فى شكل ٢٥ ـ ٩ رسماً توضيحياً لسلسلة اليورانيوم . وتنتهى جميع السلاسل بنظير أو آخر من نظائر الرصاص .

وإذا عرفنا أن السلاسل الإشعاعية الثلاث تتضمن حوالى ٥٧ تحولا ، فيمكننا أن نقدر مقدار الجهد والعمل اللازمين لفك عقدها . ولقد كان موضوع عزل نتاج التحول مستحيلا تقريباً ، إلا أنه قد تم ابتكار بعض الطرق الكيموية لفصلها .

٢٥ ــ ٩ عمر النصف للتفتت

لم نتعرض حتى الآن ، لمعدل حدوث التفتت التلقائى . وواضح أن التفتت لا يمكن أن يكون سريعاً فى جميع تفاعلات السلسلة ، وإلا فلم نكن لنجد الآن أى عنصر بعد الرصاص . ويتبع معدل التفتت قانوناً أسياًّ ، مثله فى ذلك مثل امتصاص أشعة جاما ، ولو أن الظاهرتين تختلفان اختلافاً كلياًّ . فعمر العينة من الراديوم ، مثلا ، لا نهائى . إذ توجد باستمرار بضع نوى تعانى تفتتاً . وعلى ذلك فالتعبير الأنسب للعمر هو « عمر النصف » ، وهو الزمن اللازم ليتفتت فيه نصف عدد النوى الأصلية ، ويبلغ عمر النصف للراديوم ١٥٩٠ عاماً . . أى أن الجرام من الراديوم يضمحل إلى نصف جرام من الراديوم بعد ١٥٩٠ عاماً . والفرق بين



(شكل ٢٥ ــ ١٠)

كتلة الراديوم فى الحالتين هو كتلة منتجات التحول . ويبلغ عمر النصف لليورانيوم

٤,٥ بليون من الأعوام وهو أطول عمر نصف، على أن أعمار النصف لبعض المنتجات التى تنتج فى السلاسل الإشعاعية، التى تنتهى بالرصاص قصيرة جداً. فالعينة من البولونيوم (٢١٢) (فى سلسلة الثوريوم) تضمحل إلى نصف مقدارها فى عشر ميكروثانية. والسبب الوحيد فى إمكان مشاهدة البولونيوم، هو استمرار إنتاجه من العنصر الذى يسبقه فى السلسلة وهو البزموت ٢١٢.

ويجب ألا يغرب عن بالنا، أن الاضمحلال التلقائى عشوائى، فقد تضمحل نواة معينة من الراديوم فى الحال ، أو قد تظل على ما هى عليه لآلاف السنين قبل أن تبعث بجسيم ألفا، فالمسألة مسألة مصادفة صرفة. وكل ما يمكننا قوله: هو أن نصف عدد النوى الكلى من الراديوم الموجود حالياً يضمحل إلى نوى الرادون فى ظرف ١٥٩٠ عاماً فى المتوسط. ونحن لا نعلم أى شئ عن «خطط» أية نواة معينة، فتوجد دائماً بضع نوى تحتفظ بكيانها لزمن لا نهائى، وهذا هو السبب فى أن عمر العنصر المشع لانهائى ولو أن عمر نصفه كمية محدودة يمكن قياسها بكل تحديد. ونجد فى شكل (٢٥ — ١٠) رسماً بيانياً لمعدل اضمحلال أحد العناصر المشعة.

٢٥ — ١٠ تركيب النواة

من المؤكد أن النشاط الإشعاعى يمدنا ببرهان لا لبس فيه، على أن للنواة تركيباً من نوع ما. ويظهر أن المعلومات المتوافرة لدينا تدل على أن النواة لابد أن تحتوى على جسيمات ألفا والإلكترونات، وينتج عن إزاحتهما الداخلية إشعاع جاما. ولكن ليس من الحكمة أن نحاول بناء نموذج على أساس هذه الحقائق (ولو أن، محاولات جرت فى ذلك، وقت اكتشاف طبيعة الجسيمات المنبعثة، وهذا طبيعى جدا) إذ أن لدينا الآن معلومات أكثر تمهد لنا السبيل. ويمكننا فى الحال، إدراك الخطر من افتراض أن جميع النوى مبنية من جسيمات ألفا، حيث إنه توجد نوى كثيرة لا تقبل كتلتها الذرية القسمة على أربعة، الأمر الذى يتطلبه هذا الفرض، إذا كانت جسيمات ألفا هى الجسيمات الثقيلة الوحيدة الموجودة فى النواة، وسوف نرجئ مناقشتنا للبراهين التى تؤيد عدم اعتبار الإلكترون كجزء من تركيب

النواة. والإلكترونات تنبعث فى عملية اضمحلال بيتا، وهذا يدل على أنها موجودة فى النواة ، وقد كان ذلك هو الاعتقاد السائد حتى عام ١٩٣٢ ، ولكن الرأى تغير الآن ولم تعد تقبل فكرة اعتبار الإلكترونات كنكليونات ، ولو أنها تنبعث من النواة كجسيمات بيتا .

مسائل :

١ – تبدأ إحدى السلاسل الإشعاعية بالثوريوم ٢٣٢ ، وتنتهى بالرصاص ٢٠٨ ، احسب عدد جسيمات ألفا وجسيمات بيتا التى تنبعث فى عمليات الاضمحلال المتتابعة لنواة الثوريوم حتى تنتهى إلى الرصاص .

(الجواب : ٦ جسيمات ألفا ، ٤ جسيمات بيتا)

٢ – تنبعث الجسيمات الآتية على التتابع فى اضمحلال نواة الثوريوم ٢٣٢ إلى نواة البزموت ٢١٢ : ألفا ، بيتا ، بيتا ، ألفا ، ألفا ، ألفا ، ألفا ، بيتا .

اكتب معادلات سلسلة التفاعلات المتضمنة، وعرف كل عضو فيها مستعيناً بالجدول ه .

٣ – إذا فصل البولونيوم (٢١٨) من المادة الأصلية المنتجة له ، فما نسبة ما يتبقى من هذه المادة إلى كتلتها الأصلية بعد نصف ساعة ، هذا إذا علم أن عمر النصف للبولونيوم (٢١٨) ٣ دقائق .

(الجواب : ٠,١ ٪)

٤ – احسب سعر الاستهلاك لجرام الراديوم فى ١٥٩٠ عاما ، إذا فرض أن سعره ثابت طوال هذه المدة ويساوى ١٠٠٠٠ جنيه ، للجرام .

(الجواب : ٥ × ١٠^٣ جنيهات)

٥ – يسجل عداد جسيمات ألفا ١٢٠٠ عدة فى الدقيقة للجسيمات المنبعثة من مصدر بولونيوم (٢١٠) فما هو معدل العد بعد ٤٢٠ يوماً ، من وقت إجراء التجربة . (الجواب : ١٥٠ عدة فى الدقيقة)

٦ – احسب طول موجة جسيم ألفا وشعاع جاما إذا كانت طاقة كل منهما ١ م . أ . ف (الجواب : ١,٤٢×١٠^-١٢ سم لجسيم ألفا ، ١,٢٣×١٠^-١٠ سم لجاما)

مراجع مقترحة للاطلاع

CURIE, EVE, "MADAME CURIE" New York Doubleday (1937).

وفيه تقص ابنة مكتشفة الراديوم تاريخ حياتها .

POLLARD, E., & DAVIDSON, W. L. "Applied Nuclear Physics" New York John Wiley & Sons 1942.

يعالج الباب الثالث الكشف عن الجسيمات النووية ، ويعطى الباب السادس فصلا عن الاضمحلال الإشعاعى بأسلوب يستسيغه غير المشتغلين بالعلم .

الفصل السادس والعشرون

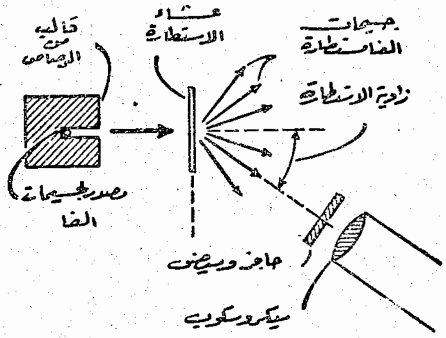
التحول الصناعى للعناصر والعمليات النووية الأخرى

٢٦ ـ ١ العلاقة بين تشتت جسيمات ألفا والأبعاد النووية

إن النشاط الإشعاعى الطبيعى وإن كان قد جابه الفيزيائى بلغز معقد إلا أنه قد يسر له ، فى الوقت نفسه ، أداة لدراسة النوى الذرية . وهذه الأداة هى جسيمات ألفا . فلديه الآن قذيفة صغيرة ذات طاقة عظيمة يمكنه استخدامها فى مهاجمة النواة . أما مسألة ضعف التحكم فى تصويب القذيفة ، فيمكن التغلب عليه باستخدام تكنية الإغراق بالطلقات ، إذ أن عدد الذرات فى الجرام الواحد من المادة المشعة ضخم جداً ، وحتى لو علمنا أن جزءاً صغيراً فقط ، من هذه الذرات، هو الذى يقذف بجسيمات ألفا فى الثانية الواحدة عند أية لحظة ، فإن عددها يظل كبيراً . فالجرام من الراديوم التى يحتوى على ٢,٧ × ١٠^٢١ ذرة (هذا العدد عبارة عن عدد أفوجادرو مقسوماً على الوزن الذرى للراديوم ٢٢٦) ، ومن هذا العدد تقذف ٣,٧ × ١٠^١٠ ذرة راديوم بجسيمات ألفا فى كل ثانية . وحتى المليجرام من الراديوم يبعث بما يبلغ ٣٧ مليوناً من جسيمات ألفا فى الثانية لكل منها طاقة تساوى ٤,٨ مليون إلكترون ڤولت ، وهى لا شك أداة قذف كامنة . ولا مناص من أن بعض القذائف فى هذا السيل المنهمر تصيب نوى الذرات التى تعترض طريقها . وطريقة إغراق الهدف بالطلقات هذه ضرورية فى جميع تجارب التصادم النووى حيث لا يمكننا تثبيت الهدف ولا توجيه القذيفة .

ولقد سبق أن رأينا أن « رذرفورد » استعان بنتائج تجارب تشتت جسيمات ألفا فى بناء نظرية الذرة النووية (راجع الفقرة ٢٣ ـ ٢) ، فلقد شوهد فى تلك التجارب (شكل ٢٦ ـ ١) أن جسيمات ألفا الساقطة على صفيحة معدنية رقيقة تنحرف بزوايا مختلفة عند نفاذها من الصفيحة . واستخدم « رذرفورد » الذرة النووية لتفسير

الانحرافات بدلالة التنافر الكهربى بين جسيمات ألفا والنوى الموجبة . وجاءت النتائج متفقة مع الفرض القائل : بأن الشحنة الموجبة ، ومعظم كتلة الذرة تتركزان فى النواة المركزية الصغيرة (أبعادها فى حدود ١٠⁻¹² سم) ، وأن قوة التشتت التى تؤثر فى جسيم ألفا ترجع إلى المجال الكهربى للنواة الذرية .



(شكل ٢٦ - ١)

على أننا إذا تأملنا فى فرض الذرة النووية نلاحظ نقصاً فى نموذج « رذرفورد » الأول ، فإذا سلمنا أن قوة التشتت هى قوة كهربية فيمكننا تصور النواة على أنها نقطة رياضية أو كرة منتظمة الشحنة ، وأن المجال الكهربى خارج الجسم المشحون فى كلتا الحالتين يساوى $\text{م} = \frac{\text{س}}{\text{ر}^{2}}$ ، وفى حالة الشحنة النقطية يكون كل شىء ، بطبيعة الحال ، فى الخارج ، ولكن الأمر يختلف فى حالة الكرة المشحونة ، إذ توجد منطقة داخلية ، المجال الكهربى فيها لا يساوى $\frac{\text{س}}{\text{ر}^{2}}$. وبالتشبيه بفيزياء الأجسام الكبيرة ، يمكننا القول : بأن القوة الكهربية تعمل ، فقط ، فى خارج النواة ، وتسمى النقطة التى يتوقف فيها عملها بحدود النواة . فللنواة ، إذن ، « قدر أو حجم » تحدده المادة النووية ، وفى داخل هذا الحجم لا تكون القوة التى تؤثر على الجسيم المصطدم بالنواة قوة كهربية عادية .

ويمكن التحقق من مسألة الحجم النووى هذه بتجارب تشتت جسيمات ألفا أيضاً . إذ أنه من الواضح ، أن معادلة « رذرفورد » للتشتت لا يمكن أن تكون صحيحة فى حالة جسيمات ألفا التى تنفذ فى الحدود النووية . ويترتب على ذلك حدوث انحرافات عن قانون كولوم . وتسمح لنا قياسات تلك الانحرافات بتقدير الحجم النووى .

ولعلنا نتساءل كيف يمكن أن تكون معادلة « رذرفورد » صحيحة وخاطئة فى

الوقت نفسه ، وربما يكون فى المثال الآتى ما يوضح هذه المسألة ، فلنأخذ حالة جسيم ألفا طاقته ٧,٧ ملايين إلكترون ڤولت مصوباً نحو صفيحة رقيقة من الذهب ، وحيث إن العدد الذرى للذهب ذ = ٧٩ ، فإن شحنته النووية تساوى + ٧٩ ش وفى حالة التصادم المباشر (أى وجهاً لوجه) ، يمكن لجسيم ألفا أن يقترب إلى مسافة (ف) من مركز نواة الذرة حيث يتوقف لحظياً ، إذ أن طاقة حركته تتحول كلية إلى طاقة كامنة (طاقة وضع) ، وعلى ذلك ، فإذا كانت طاقة جسيم ألفا (ط) = $\frac{1}{2}$ ك ع^{2} فإنها تساوى طبقاً للمعادلة ١٢ — ٣

$$\text{ط} = \frac{1}{2}\,\text{ك ع}^{2} = \frac{(\text{٧٩ ش})\,(\text{٢ ش})}{\text{ف}}$$

$$\text{أى أن ف} = \frac{2 \times 79 \times (4{,}8 \times 10^{-10})^{2}}{7{,}7 \times 10^{6} \times 1{,}6 \times 10^{-13}} = 30 \times 10^{-13}\ \text{سم}$$

فالمسافة ٣٠ × ١٠$^{-١٣}$ سم هى ، إذن ، أقرب بعد من نواة الذهب يمكن أن يكون عليه جسيم ألفا* ، وحيث إنه لا تشاهد انحرافات فى تشتت جسيمات ألفا ذات الطاقة ٧,٧ م . ا . ف بالذهب ، فنصف قطر النواة يقل عن ٣٠ × ١٠$^{-١٣}$ سم .

وإذا كانت النواة المشتتة أخف (أى كانت شحنتها أقل) ، أو كانت طاقة جسيمات ألفا أعلى من القيمة المذكورة ، فإن ف تصبح أصغر ، وعندما تصبح قيمة ف قريبة من نصف قطر النواة ، فى هذه الحالة ، يجب أن تظهر الانحرافات عن معادلة « رذرفورد » للتشتت .

ولقد قاس رذرفورد عام ١٩٠٩ ، تشتت جسيمات ألفا ذات الطاقة ٧,٧ م . ا . ف فى غاز الأيدروجين ، ولما كان التصادم المباشر لهذا النوع من الجسيمات فى المجال الكهربى لذرة الأيدروجين يعطى أقل بعد للاقتراب قدره ١,٩ × ١٠$^{-١٣}$ سم ؛

* كان المفروض أثناء استنتاج المعادلة أن النواة المشتتة تبقى ثابتة ، أما إذا أخذنا نكوصها فى الاعتبار فتصبح المعادلة الصحيحة : $\text{ف} = \frac{\text{ذ ذَ ش}^{2}}{\text{ط}} \times \frac{\text{ك} + \text{كَ}}{\text{كَ}}$

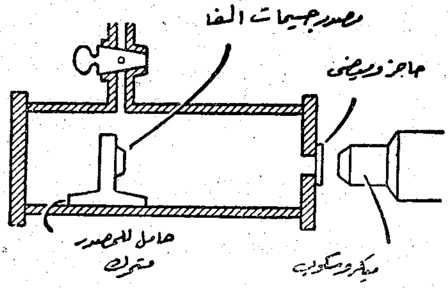
حيث ذ ش ، ك ، ط هى شحنة الجسيم الساقط وكتلته وطاقته وحركته ، ذَ ش ، كَ هى شحنة النواة المشتتة وكتلتها .

فيظهر أن هذه المسافة أقل من الأبعاد النووية ، إذ شوهد فى التجربة انحرافات كبيرة عن معادلة التشتت ، وكانت النتيجة التى استخلصت من هذه التجربة أن أبعاد الجسيمات النووية المتصادمة تبلغ حوالى ٣×١٠^{-١٣} سم .

٢٦ — ٢ تشتت جسيمات ألفا والتصادم المرن

يتوقف قانون القوة بين جسيم ألفا والنواة على قربهما من بعضهما ، ولكن الطاقة التى تكتسبها النواة أثناء التصادم لا تتوقف على قانون القوة ، هذا إذا خضعت كل من كمية التحرك وطاقة الحركة لقانونى البقاء أثناء التصادم (راجع الفقرة ٧ — ٢) ، ولقد كانت مسألة التحقق من صلاحية تطبيق قوانين البقاء فى حالات الجسيمات النهائية للمادة أمراً فى غاية الأهمية .

ويمكن دراسة قوانين تشتت جسيمات ألفا بالتفصيل فى الغازات ، حيث يمكن مشاهدة النواة المرتدة . فلنأخذ ، مثلا ، جهازاً كالمبين فى شكل ٢٦—٢ وهو الجهاز الذى استخدمه مارسدن ثم تبعه « رذرفورد » فى دراسة انتقالات كمية التحرك وطاقة الحركة أثناء تصادمات جسيمات ألفا . فيعطينا قانون بقاء كمية التحرك (راجع الفقرة ٧ — ٤) المعادلة الآتية فى حالة التصادم المباشر المرن لجسيم ألفا ذى كمية التحرك ك١ ع١ بنواة ساكنة كتلتها ك٢ :



(شكل ٢٦ — ٢)

$$\text{ك}_{١}\,\text{ع}_{١} = \text{ك}_{١}\,\text{ع}'_{١} + \text{ك}_{٢}\,\text{ع}'_{٢}$$

وبالرجوع إلى المعادلة ٧ — ٧ نجد أن :

$$\text{ع}'_{٢} = \text{ع}_{١}\,\frac{٢\,\text{ك}_{١}}{\text{ك}_{١} + \text{ك}_{٢}}$$

حيث ع١ هى سرعة جسيم ألفا بعد التصادم ، ع٢ هى سرعة النواة المرتدة . وفى

حالة تصادمات جسيمات ألفا مع نوى الأيدروجين تكون $ك_١$ = ٤ وحدات كتلة ذرية ، $ك_٢$ = ١ كتلة ذرية ، وعلى ذلك ترتد ذرة الأيدروجين التى تتعرض لتصادم مباشر بسرعة تساوى $٢ \times \frac{٤}{١+٤} = \frac{٨}{٥}$ من سرعة جسيم ألفا الساقط .

والنسبة بين طاقة حركة الارتداد وطاقة الحركة للجسيم الساقط تساوى :

$$\frac{\frac{١}{٢} ك_٢ ع_٢^٢}{\frac{١}{٢} ك_١ ع_١^٢} = \frac{ك_٢}{ك_١} \times (\frac{٨}{٥})^٢ = \frac{١}{٤} \times \frac{٦٤}{٢٥} = \frac{١٦}{٢٥}$$

وعلى ذلك فطاقة نواة الأيدروجين المرتدة تساوى $\frac{١٦}{٢٥}$ من طاقة جسيم ألفا الساقط . وتتحرك النواة المرتدة فى هذا التصادم بسرعة كبيرة جداً ، لدرجة أنها تترك إلكترونها وراءها . وتسمى نوى الأيدروجين هذه « بالبروتونات » ، وحيث إنها أخف من جسيمات ألفا ، وشحنتها نصف شحنة الأخيرة ، فإن مداها أطول بكثير من مدى جسيمات ألفا القريبة منها فى الطاقة ، وعلى ذلك فيمكن الكشف عن وجود البروتونات بمداها الكبير . ولقد كانت طاقة جسيمات ألفا المستخدمة فى هذه التجارب ٧,٧ م . ا . ف وعلى ذلك فطاقة البروتونات المرتدة وصلت إلى $\frac{١٦}{٢٥} \times ٧,٧ = ٤,٩$ م . ا . ف ويبلغ مداها فى غاز الأيدروجين ١٣٠ سم ، ومن الطبيعى أن توجد بروتونات ذات مدى أقصر من ذلك ناشئة عن تصادمات جسيمات ألفا ، التى استنفدت بعضاً من طاقتها فى التأيين ، أضف إلى ذلك وجود بروتونات مشتتة بزوايا تختلف عن الصفر ، ولقد شوهدت هذه البروتونات فعلا .

٢٦ ـ ٣ اكتشاف « رذرفورد » للتحول الصناعى للعناصر (١٩١٩) :

من الواضح أنه ينشأ عن التشتت المرن لجسيمات ألفا فى الغازات ذات الذرات الثقيلة نوى مرتدة بسرعة صغيرة نسبية ، لها قوة تأيين كبيرة ومدى قصير ، على أنه عندما أجرى « رذرفورد » تجربته على تشتت جسيمات ألفا فى غاز النتروجين ($_٧ن^{١٤}$) مستخدماً جهازاً شبيهاً بالجهاز المبين فى شكل ٢٦ ـ ٢ شاهد ومضات على مدى أكبر بكثير من تلك الومضات التى تحدثها جسيمات ألفا الساقطة ، وأبعد من الومضات المنتظرة من نوى النتروجين المرتدة . وعلى وجه التحديد ،

استخدم جسيمات ألفا ذات طاقة ٧,٧ م . ا . ف ومداها فى النتروجين ذى الضغط الجوى العادى ٧ سم . وعلى ذلك فإذا كانت المسافة بين الحاجز الوميضى والمصدر أكبر من ٧ سم ، فإن الومضات الناشئة عن جسيمات ألفا تختفى . أضف إلى ذلك أن سرعة نواة النتروجين المرتدة من التصادم المباشر المرن تساوى :

$$ع_{٢}َ = ع_{١} \frac{٢ ك_{١}}{ك_{١} + ك_{٢}}$$

أى
$$ع_{٢}َ = \frac{٢ \times ٤}{٢ + ١٤} ع_{١} = \frac{٤}{٩} ع_{١}$$

على أن المسافة التى يمكن لنواة النتروجين ذات السرعة التى تبلغ $\frac{٤}{٩}$ سرعة جسيمات ألفا الساقطة أن تقطعها لم تكن معروفة تماماً ، ولكن نظراً لكبر كل من كتلتها وشحنتها ، فإن مداها يجب أن يكون قصيراً جداً ، فلا يتجاوز سنتيمتراً واحداً أو ٢ سم على أحسن الظروف ، فهو بكل تأكيد أقصر من مدى جسيمات ألفا الساقطة الذى يبلغ ٧ سم . إلا أن « رذرفورد » لاحظ أنه عندما أبعد المصدر عن الحاجز بمسافة وصلت إلى ٢٨ سم كان لا يزال فى إمكانه مشاهدة ومضة بين الحين والآخر . فنحن الآن أمام نوع من التصادم جديد تماماً . فلم يكن ليعقل أن نواة النتروجين الثقيلة يمكنها أن تسير كل هذه المسافة . إذ كيف لها أن تحصل على الطاقة الهائلة اللازمة لذلك ؟ ومن المحتمل أن الومضات كانت ناتجة عن جسيم ألفا حصل بطريقة ما على بعض من الطاقة الإضافية من نواة النتروجين . ولكن جسيم ألفا يلزمه حوالى ٢٠ مليون إلكترون فولت ليسير مسافة ٢٨ سم . ومن ناحية أخرى ، كان معروفاً من تجارب التصادم المباشر فى الأيدروجين السابق مناقشتها ، أن نواة الأيدروجين تطلبت ٣,٨ م . ا . ف فقط لتسير ٢٨ سم فى النتروجين عند الضغط الجوى ، وذلك نظراً لصغر كتلتها وشحنتها المفردة .

اقترح « رذرفورد » جواباً جريئاً بعيد المرمى لهذه المشكلة . فى هذا التصادم لا تخضع طاقة الحركة للجسيم الساقط لقانون البقاء ، أضف إلى ذلك أن الجسيم

ذاته يفقد شخصيته . اقترح « رذرفورد » أن جسيم ألفا « دخل » نواة النتروجين أثناء التصادم وانبعثت نواة أيدروجين (بروتون) ، وإذا أضيفت نواة هيليوم $_{٢}$هى^{٤} إلى نواة النتروجين $_{٧}$ن^{١٤} عند لحظة التصادم وانبعثت نواة أيدروجين $_{١}$يد^{١} فإن النواة المتبقية يجب أن تكون قد اكتسبت شحنة موجبة واحدة وثلاث وحدات كتلة أثناء العملية . والعنصر الذى عدده الذرى ٨ هو الأكسيجين ، وعلى ذلك فالنتروجين $_{٧}$ن^{١٤} تحول إلى أكسجين $_{٨}$أ^{١٧} ، ويمكننا كتابة المعادلة النووية على الصورة :

$$_{٧}ن^{١٤} + {}_{٢}هى^{٤} = {}_{٨}أ^{١٧} + {}_{١}يد^{١}$$

وعندما تتحول نواة إلى أخرى جديدة نتيجة لعملية تصادم ، فإن العملية تسمى « بالتحول الصناعى للعناصر » ، وحيث إن البروتون المنبعث أخف من جسيم ألفا ، ويحمل شحنة واحدة فقط ، فإنه يؤين بمعدل أقل ، وعلى ذلك يظهر أثره فى غرفة « ولسن » السحابية أرق من أثر جسيم ألفا . وعندما أعيدت تجربة « رذرفورد » باستخدام غرفة سحابية مملوءة نتروجينا شوهدت عمليات التحول وتأكدت بوضوح آثار البروتونات المنبعثة الطويلة المدى كما وضحت الآثار القصيرة والكثيفة لنوى الأكسيجين $_{٨}$أ^{١٧} المرتدة .

٢٦ — ٤ التحولات الصناعية للعناصر

قد اكتشفت المئات المتعددة من تحولات العناصر فى السنوات التى أعقبت اكتشاف « رذرفورد » لتحول النتروجين . وكانت هذه التحولات تنتج حتى عام ١٩٣٢ عن جسيمات ألفا المنبعثة من المواد ذات النشاط الإشعاعى الطبيعى فقط . ولكن استخدمت قذائف جسيمية أخرى بنجاح منذ اختراع معجلات الجسيمات (راجع الفصل الثامن والعشرين) .

وسوف لا نحاول تصنيف الأنواع المتعددة من التحولات هنا . فإنها لا تختلف فقط ، من ناحية النظير المحول والقذيفة الجسيمية ، ولكنها تختلف أيضاً من ناحية الأنواع المتعددة من الجسيمات المنبعثة ، والجسيمات المشحونة التى يغلب استخدامها

فى إحداث التحول هى جسيمات ألفا (يرمز لها بالرمز α) والديوترونات (نوى نظير الأيدروجين ذى الكتلة ٢ ويرمز لها بالرمز د) والبروتونات (ب) ، ويغلب فى هذه العمليات انبعاث البروتونات والنيوترونات (راجع الفقرة ٢٦ — ٥) ، ويمكننا صياغة التفاعل (α ، ب) على الصورة .

$$ {}_{٧}\text{ن}^{١٤} + {}_{٢}\text{هى}^{٤} \longrightarrow {}_{٨}\text{أ}^{١٧} + {}_{١}\text{يد}^{١} $$

وتكتب رمزيًّا على الصورة :

$$ {}_{٧}\text{ن}^{١٤} \quad (\alpha \text{ ، ب}) \quad {}_{٨}\text{أ}^{١٧} $$

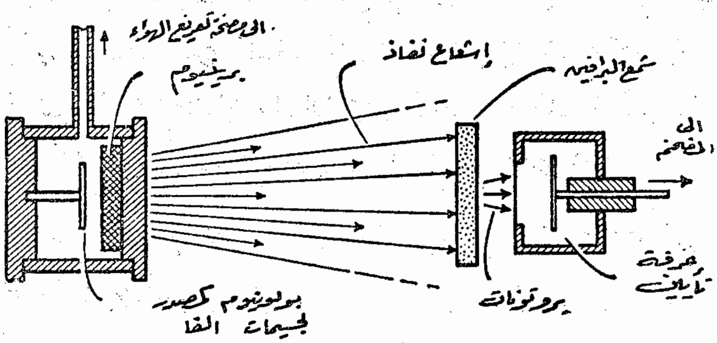
ويوجد بالإضافة إلى ذلك التفاعلات (د ، ب) ، (د ، α) ،(ب ، α) وتفاعلات أخرى كثيرة متعددة الأنواع .

وعلى الرغم من وجود أنواع كثيرة لتجارب التحولات ، إلا أنه من الممكن استخلاص بعض القواعد العامة : (١) يجب أن تتزن الأعداد الذرية أى الشحنات فى التفاعل ، فالشحنات فى الطرف الأيمن للتفاعل ${}_{٩}\text{فل}^{١٩}$ (α ، ب) ${}_{١٠}\text{نى}^{٢٢}$. (٩ + ٢) يجب أن تساوى الشحنات فى الطرف الأيسر (١٠ + ١) ، (٢) يجب أن تتزن الكتل النظيرية (معبراً عنها بأعداد صحيحة) ، فأعداد الكتلة فى التفاعل ${}_{٥}\text{يو}^{١٠}$ (α ، ب) ${}_{٦}\text{ك}^{١٣}$ هى (١٠ + ٤) ، (١٣ + ١) ويجب أن تتساوى . (٣) ينبعث فى العادة جسيم واحد فقط فى التفاعل إلا فى الحالات التى تكون فيها القذيفة ذات طاقة كبيرة جداًّ . على أنه قد يشذ عدد قليل من التفاعلات حتى فى حالات الطاقات المنخفضة عن قاعدة «جسيم واحد يدخل وجسيم واحد يخرج» . وفى حالات الطاقات الكبيرة جداًّ تنبعث عدة جسيمات فى الغالب . (٤) يصحب تفاعلات الجسيمات عادة انبعاث أشعة جاما التى تنشأ عن وجود النواة النهائية فى حالة مضطربة ، ولأشعة جاما هذه طاقات محددة تحديداً واضحاً ومميزة لكل نواة ، وهذا يثبت أن النواة لها خاصية الكم ،مثلها فى ذلك مثل الذرة . (٥) تكون التحولات لحظية تقريباً، إذ تعطى التقديرات النظرية زمناً قدره ${١٠}^{-١٥}$ ثانية لهذه التفاعلات .

٢٦ ــ ٥ اكتشاف « شادويك » للنيوترون

يوجد تشابه واضح بين اكتشاف « رذرفورد » للتحول الصناعى للنواة وبين اكتشاف «شادويك (Chadwick) » للنيوترون عام ١٩٣٢، (كان شادويك تلميذاً لرذرفورد وعمل فى معمله بإنجلترا) . فكانت تجاربهما متماثلة سطحياً ، وفى كلتا الحالتين تمخضت عن نتائج محيرة ، كما أن التفسيرات الصحيحة جاءت فى الحالتين نتيجة لاستنتاج يدل على النبوغ .

ولقد قذف العالمان الألمانيان بوته وبيكر (Bothe, Becker) البريليوم بجسيمات ألفا فى أوائل عام ١٩٣٠ ، ووجدا أنه كانت تنبعث من التفاعل إشعاعات نفاذة جداً . فظنا أن نواة البريليوم أسرت جسيم ألفا وانبعث نتيجة لذلك شعاع من أشعة جاما ، له قوة نفاذية عظيمة ، على أن فريدريك چوليو (Frederick Joliot) وأيرين كورى چوليو (Irène Curie-Joliot) (ابنة مكتشفى البولونيوم والراديوم) حاولا اختبار امتصاص أشعة جاما المزعومة هذه، فى المواد المختلفة ، وكان من بينها شمع البرافين . فوجدا لدهشتهما ، أن البروتونات كانت تنبعث من شمع البرافين (شكل ٢٦ ــ ٣) وافترضا أن ذلك كان ناتجا عن نوع من تأثير كومتن للبروتونات .



(شكل ٢٦ - ٣)

فانزعج شادويك لهذا التفسير . وقاس مدى البروتونات المنبعثة من شمع البرافين (الذى يتكون من جزيئات تحتوى على الأيدروجين والكربون) وكان متوخياً الدقة

فى قياسه فوجد أن طاقة البروتون تبلغ ٨,٣ م . ا . ف ، والآن لو كانت حركة هذا البروتون جاءت نتيجة لتصادم مرن بفوتون أشعة جاما ، فلابد أن تكون طاقة هذا الفوتون ٥٥ م . ا . ف (يمكن الوصول إلى هذه النتيجة مباشرة من حسابات كمية التحرك البسيطة) ، وقد يكون من المحتمل جداًّ أن طاقة الفوتون تبلغ هذا القدر ، على أنه إذا كان الأمر كذلك ، فينبغى أن يكون فى مقدوره إعطاء نواة ثقيلة ، كنواة النتروجين مثلا ، طاقة قدرها ٠,٣٥ م . ا . ف . وباستبدال النتروجين بشمع البرافين وقياس مدى نواة النتروجين المصطدم بها ، وجد « شادويك » أن الطاقة التى أعطاها فوتون أشعة جاما المزعوم لنواة النتروجين تبلغ نصف ما كان ينتظر حسابياًّ فقط . ومن ناحية أخرى ، لو أنه افترض أن الجسيم المجهول لم يكن فوتونا بل كان جسيما له كتلة تساوى كتلة البروتون ، وطاقة تساوى ٨,٣ م . ا . ف تماماً ، وهى طاقة البرتون المنتزع ، تكون طاقة نواة النتروجين التى تعطيها الحسابات صحيحة تماماً . ولكن لا يمكن للجسيم المجهول أن يكون فعلا بروتونا ، إذ أن له قوة نفاذ عظيمة جداًّ (تأيين ضعيف) ، تفوق ما للبروتون ذى الطاقة ٨,٣ م . ا . ف . وبناء على ذلك استنتج شادويك استنتاجاً منطقياًّ ولكنه باهراً ، وهو : إن كتلة الجسيم المجهول لابد أن تكون مساوية تقريبا لكتلة البروتون ، ولكنه يختلف عنه فى الشحنة ، وفى الحقيقة ، ليست له شحنة على الإطلاق . وأطلق عليه اسم « النيوترون » فالنيوترون جسيم كتلته تساوى كتلة البروتون تقريبا ولا يحمل شحنة كهربية . ويرجع السبب فى تفوقه فى قوة النفاذية على البروتون إلى خلوه من الشحنة الكهربية ، فهو يفقد طاقته أثناء سيره فى الوسط المادى عندما يصطدم بالنوى فقط .

وتمكن شادويك من كتابة معادلة تفاعل البريليوم ، فباستخدام الرمز (ن^{١}) للدلالة على النيوترون نحصل على :

$${}_{٤}\text{بى}^{٩} \quad {}_{٢}\text{هى}^{٤} \longrightarrow {}_{٦}\text{ك}^{١٢} + {}_{٠}\text{ن}^{١} \quad \text{أو} \quad {}_{٤}\text{بى}^{٩}\ (\times ,\text{ن})\ {}_{٦}\text{ك}^{١٢}$$

وهكذا خرج من باطن النواة جسيم جديد .

٢٦ ــ ٦ خواص النيوترون

عندما يقترب جسيم مشحون من الذرة يتفاعل مجاله الكهربى بإلكتروناتها ونواتها ، وهذا التفاعل هو الذى يحدث التأيين . ولكن النيوترون ، يتجاهل جميع المجالات الكهربية ، لكونه متعادلا ، ولا يبطئ من سرعته إلا التصادمات المباشرة بالنوى . وحيث إن كتلة النيوترون تساوى كتلة البروتون تقريباً ، فإن تصادماً مباشراً واحداً بالبروتون يوقف النيوترون تماماً . وهذا هو التصادم الذى أنتج البروتونات التى شاهدها شادويك فى شمع البرافين ، ومن ناحية أخرى إذا اصطدم النيوترون بنواة ثقيلة ، فإنه يرتد فى اتجاه ما غير اتجاهه الأصلى ويصحب ذلك نقص طفيف فى طاقته . ففى التصادم بين النيوترون ونواة الرصاص ذات عدد الكتلة ٢٠٨ تكتسب الأخيرة $\frac{٢}{٢٠٩}$ من سرعة النيوترون فقط . وعلى ذلك فالرصاص يعتبر حاجزاً أو عائقاً ضعيفاً للنيوترونات ، وكذلك الحال فى أى عنصر ثقيل . والعناصر الخفيفة أفضل من الثقيلة فى هذا الشأن ويفضلها جميعاً الأيدروجين . فالنيوترون ، الذى طاقته بضعة ملايين من الإلكترون فولت ، يمكنه أن ينفذ خلال عدة أقدام من الرصاص ، فى حين أنه ينفذ من بضع بوصات فقط من الماء ، أو شمع البرافين ، أو المواد الهيدروجينية المماثلة .

ولا يمكن تعيين كتلة النيوترون بالطرق الطيفية المعتادة ، إذ أنه لا يحمل شحنة كهربية ولا ينثنى مساره فى المجالات الكهربية أو المغنطيسية ، ويستعاض عن ذلك بتعيينه من حسابات الكتل والطاقات الداخلة فى التفاعلات النووية . وتعطى عملية تفتت الديوترون بأشعة جاما (راجع الفقرة ٢٧ ــ ٥) ، بوجه خاص ، قيمة دقيقة لكتلة النيوترون . وهذه القيمة هى :

كتلة النيوترون = ١,٠٠٨٩٤ وحدة كتلة .

وهى أكبر قليلا من كتلة البروتون التى تبلغ ١,٠٠٨١٣ وحدة كتلة .

والنواة هى المصدر الوحيد للنيوترونات ، ولا يزال تفاعل البريليوم الأصلى الذى أجراه شادويك من أخصب مصادر النيوترونات ، ومهما يكن من أمر ، فقد

عرفت حتى الآن تفاعلات جسيمية كثيرة تنبعث فيها النيوترونات . وما إن يتحرر النيوترون من النواة ، حتى يحتفظ بذاتيته طوال الفترة التى تكفيه ، فقط ، لأن يدخل ثانية فى نواة أخرى أو يتحلل فى عملية إشعاعية ، وهذه العملية الأخيرة هى التى تفسر اختفاء جميع النيوترونات تقريباً . فلم يحدث على الإطلاق ، أن حصل أى باحث على كتلة من النيوترونات الصرفة فى معمله . وحتى إذا قدر للنيوترون أن يوجد ككيان ذاتى حر لفترات زمنية طويلة ، فإنه لا يمكن أن تكون له أى خواص كيموية أو قوى ذرية ، ويتوقف متوسط عمر النيوترون على ما يصادفه من عمليات ، ولكنه يقع فى حدود عدة دقائق .

٢٦ ـ ٧ مركبات النواة

اقترح براوت (Prout) فى أوائل القرن التاسع عشر أن جميع الذرات تتكون من ذرة أو أكثر من ذرات الأيدروجين . وهذا بالطبع غير صحيح ، ولكن فكرة براوت بأن الأعداد الصحيحة لقيم كتل الذرات تقيم الدليل على وجود لبنات تشترك فى بناء جميع النوى ما زالت باقية حتى يومنا هذا . ولقد تعرضت ذاتية تلك اللبنات المشتركة للتغير من حين إلى آخر ، أما الآن فيبدو أن الإجابة على التساؤل عن هذه اللبنات أصبحت واضحة ــ فالمركبات الأولية (النكليونات) لجميع النوى هى البروتونات والنيوترونات . ولكن ما هو البرهان على صحة هذا الرأى ؟

إذا كان للنواة مركبات فلا يمكن التعرف عليها إلا فى حالة انفصالها عن النواة فقط ، كما كانت الحال فى الإلكترونات الذرية ، فقد أمكن التعرف عليها بتأيين الذرة ، على أن هذا لا يعنى أن أى شئ ينفصل عن النواة يكون جسيما نوويًّا أوليًّا . فجسيمات ألفا تنبعث من العناصر المشعة طبيعيًّا ولا يمكن اعتبارها نكليونات ، إذ لو كان الأمر كذلك لكانت الكتل الذرية جميعها أعداداً زوجية وكانت الأعداد الذرية للعناصر نصف كتلها الذرية بالضبط ، ولم تكن لتوجد ذرات أخف من ذرة الهيليوم . والإلكترونات (أشعة β) تخرج من النواة ، ولكنها كما سنرى فيما بعد (فقرة ٢٦ ــ ٩) لا توجد عادة داخل النواة ، بل يتكون قبل إشعاعها مباشرة ،

أما أشعة جاما فليس لها كتلة سكون أو شحنة ، وعلى ذلك فتخرج من الاعتبار كمركبة من المركبات النووية . بقى لدينا الآن البروتونات كمركبات نووية . ولقد شوهدت وهى تخرج من النواة . ويفسر النموذج النووى للبروتونات والنيوترونات الحقائق المعروفة الآتية :

١ — الشحنة النووية . تكون الشحنات التى على البروتونات ، كل بروتون يحمل شحنة (+ ش) ، الشحنة النووية الموجبة ، وعلى ذلك فالعدد الذرى يساوى عدد البروتونات فى النواة .

٢ — الكتلة النووية : عدد النيوترونات + البروتونات يعطينا عدد الكتلة الذرية ، وهذا يفسر قيمها العددية الصحيحة .

٣ — اللف النووى : للنوى ، مثلها فى ذلك مثل الإلكترونات ، كميات تحرك زاوية للف . فلكل من البروتون والنيوترون لف يساوى عدديا لف الإلكترون ، وهو نوع من وحدات اللف* لجميع الجسيمات الأساسية . ويتخذ لفا البروتون والنيوترون فى النواة إما اتجاه تواز وإما لا توازى فى أزواج ، وعلى ذلك فللديوترون (لفا بروتون ونيوترون بالتوازى) لف قدره وحدتان أساسيتان . ولقد لوحظ أن لف جميع النوى ذات الكتل الذرية الزوجية إما صفر وإما عدد زوجى من الوحدات الأساسية ، وهذا هو الذى نتوقعه من قاعدة التوازى واللاتوازى .

٢٦ — ٨ النشاط الإشعاعى الصناعى

غالباً ما تؤدى التحولات الصناعية للعناصر إلى إنتاج نوى لا توجد ضمن النظائر الطبيعية . وهذه النوى غير مستقرة بكيفية تشبه إلى حد ما العناصر ذات النشاط الإشعاعى الطبيعى ، وتسمى هذه الظاهرة بالنشاط الإشعاعى الصناعى أو المستحث .

وهناك اختلاف بيّن بين الانحلال الإشعاعى الطبيعى والصناعى . فالنوى

---

* وحدة اللف طبقاً لنظرية الكم تساوى ٢ ، ١ $\frac{1}{2}$ $\left(\frac{h}{\Pi c}\right)$.

المشعة طبيعيا تبعث بإلكترونات أو جسيمات ألفا ، فى حين أن النوى المشعة المنتجة صناعيا تبعث إما بإلكترونات ، وإما بجسيم جديد يسمى الإلكترون الموجب أو البوزيترون . وهو يحمل شحنة كهربية قدرها + ش وكتلته تساوى كتلة الإلكترون ، ولقد اكتشفت عام ١٩٣٢ بوزيترونات نتجت عن ظاهرة أخرى هى الإنتاج الزوجى للإلكترونات (فقرة ٢٧ — ٧) .

كانت كورى وجوليو هما اللذين أعلنا عن أول عملية للنشاط الإشعاعى الصناعى عام ١٩٣٤ ، فعندما قذفا الألومنيوم بجسيمات ألفا حدث التفاعل التالى :

$$_{١٣}\text{لو}^{٢٧} + {}_{٢}\text{هى}^{٤} \longrightarrow {}_{١٥}\text{فو}^{٣٠} + {}_{٠}\text{ن}^{١}$$

وكشفا عن وجود النيوترونات بهذه الطريقة التى اتبعها شادويك فى اكتشاف النيوترون ، ووجدا بالإضافة إلى ذلك أن هدف الألومنيوم أصبح مشعا وبعث بأشعة أمكن الكشف عنها بعداد جيجر . وخلصا إلى أن النشاط الإشعاعى كان راجعا إلى الكمية الصغيرة من الفسفور $_{١٥}$فو^{٣٠} التى نتجت أثناء التفاعل النووى . ووجدا أن عمر النصف للفسفور المقيس كان (٢,٦ دقيقة) . ولقد وجدا أن الإشعاع يتكون من بوزيترونات ، وذلك عن طريق اعتراض بعض المواد الماصة لمسار الأشعة ، وكذلك بثنى المسار فى المجال المغنطيسى .

نجد فى الجدول (د) من التذييل كشفا بالنظائر المستقرة المعروفة للعناصر الخفيفة طبقاً للنتائج التى أعطاها مطياف الكتلة . ولعلنا نلاحظ أنه يوجد فى الطبيعة نظير واحد فقط للفسفور هو $_{١٥}$فو^{٣١} ، وهذا يؤدى بنا إلى الظن بأنه إذا تكوّن أى نظير آخر للفسفور فلابد أن يكون غير مستقر . ويصل هذا النظير إلى الاستقرار بالتحول إلى عنصر آخر مستقر . وتقوم العناصر التى تلى الرصاص فى جدول العناصر بنفس العملية إلا أنه توجد اختلافات :

١ — أنها انحدرت من أصول ذات عمر طويل ، وعلى ذلك لا تزال هذه توجد فى الطبيعة .

٢ — أنها تضمحل نحو الاستقرار بوسيلتين هما انبعاث الإلكترونات وانبعاث جسيمات ألفا .

أما العناصر المشعة صناعيا ، والتى تأتى قبل الرصاص فى جدول العناصر ، فإنها تضمحل بانبعاث الإلكترونات أو البوزيترونات فقط ، ولو أنه قد يصحب ذلك أشعة جاما . وقد يؤدى الانبعاث الإشعاعى الواحد مباشرة ، فى أغلب الأحيان ، إلى نواة مستقرة ، وهذا على عكس الحال فى الاضمحلال الإشعاعى الطبيعى . وتطبق هذه القاعدة عادة لاستبعاد إحدى عمليتى انبعاث الإلكترون أو انبعاث البوزيترون التى لا تؤدى إلى نواة مستقرة (هناك بضع حالات يؤدى فيها انبعاث الإلكترون أو انبعاث البوزيترون إلى الاستقرار ، وحدوث أى الانبعاثين فى هذه الحالات غير محدد ، فبعض نوى النوع الواحد يضمحل بانبعاث الإلكترون والبعض الآخر يضمحل بانبعاث البوزيترون) .

ولتطبيق هذه القاعدة ، نحاول الكيفيتين التى يمكن أن يضمحل بهما ${}_{15}\text{فو}^{30}$

١ – إذا انبعث إلكترون يكون التفاعل على الصورة :

$$ {}_{15}\text{فو}^{30} \longrightarrow {}_{-1}\text{ش}^{0} + {}_{16}\text{كب}^{30} $$

٢ – وإذا انبعث بوزيترون يكون التفاعل على الصورة :

$$ {}_{15}\text{فو}^{30} \longrightarrow {}_{+1}\text{ش}^{0} + {}_{14}\text{س}^{30} $$

وبالرجوع إلى جدول النظائر نجد أنه لا يوجد نظير مستقر للكبريت كتلته الذرية ٣٠ ، ولكننا نجد أن ${}_{14}\text{س}^{30}$ نظير مستقر . وعلى ذلك فالفسفور يبعث ببوزيترون ، وتؤكد هذه النتيجة تجربة انحناء مسار الجسيم المنبعث فى المجالات الكهربية والمغنطيسية .

ويمكننا الآن كتابة التفاعل الكامل الذى شاهده كورى وجوليو

$$ {}_{13}\text{لو}^{27} + {}_{2}\text{هى}^{4} \longrightarrow {}_{15}\text{فو}^{30} + {}_{0}\text{ن}^{1} $$

$$ \xrightarrow{\text{٢,٦ دقيقة}} {}_{14}\text{س}^{30} + {}_{+1}\text{ش}^{0} $$

ويطلق على العنصر ذى النشاط الإشعاعى الصناعى غالباً اسم العنصر المشع ، وعلى ذلك فنحن نتكلم عن فو^{30} على أنه فسفور مشع .

ويمكن فهم حجة اللف إذا تأملنا النشاط الإشعاعى الصناعى لنظير الأيدروجين ذى الكتلة ٣

$_{1}$يد^{3} ⟵ $_{2}$هى^{3} + $_{-1}$ش^{0}

حيث اللف المشاهد لكل من $_{1}$يد^{3}، $_{2}$هى^{3} يساوى وحدة أساسية واحدة، أى يساوى لف الإلكترون . ولا يمكن تفسير ذلك إلا بإضافة جسيم ثالث (النيوترينو) له لف يساوى الوحدة ، وإلا فإن لف $_{2}$هى^{3} لابد أن يكون إما صفرا وإما مساوياً وحدتى لف ، هذا إذا أردنا المحافظة على قانون بقاء اللف .

وينبغى لنا أن نذكر ، قبل أن ننتهى من هذا الموضوع . أن النيوترون لا يؤخذ عليه أنه إلكترون + بروتون + نيوترينو ، فالإلكترون ينبعث أثناء تحول النيوترون إلى بروتون ، تماماً ، مثل انبعاث كمة الضوء عندما تتحول الإلكترونات الذرية من أحد مستويات الطاقة إلى مستوى آخر ، فنحن لا نقول : إن الإلكترون الذرى فى الحالة المضطربة هو إلكترون + كمة ، إنما الكمة تنبعث عند لحظة التحول .

ولقد تأكد ، بصورة يمكن القول بأنها قاطعة ، وجود النيوترينو فى انبعاث بيتا ، من التجارب التى قيست فيها كميتا تحرك جسيم بيتا والنواة المرتدة فى آن واحد . واستنتج من ذلك كمية تحرك النيوترينو باستخدام قانون بقاء كمية التحرك ، ومن العدل أن نقرر أن الدور الأساسى للنيوترينو حفظ صلاحية قوانين بقاء الطاقة وكمية التحرك ، وربما كان وجود النيوترينو من نوع الوجود المعنوى أو البحث الذى سبق أن مارسناه فى الأثير .

مسائل :

١ — إذا اصطدم بروتون بنواة هيليوم تصادماً مباشرا مرناً فما هو جزء الطاقة الذى تكتسبه نواة الهيليوم من البروتون ؟ (الجواب $\frac{١٦}{٢٥}$)

٢ — عندما تصدم نيوترونات مجهولة الطاقة بنوى غاز الهيليوم ، يلاحظ وجود جسيمات ألفا تتحرك فى الاتجاه الأصلى لاتجاه النيوترونات بطاقة قدرها ٣,٥٠ م . ا . ف فما هى طاقة النيوترونات ؟

(الجواب : ٥,٤٧ م . ا . ف)

٣ — اكتب عدد البروتونات والنيوترونات فى النوى الآتية : هى^{٤} ، ك^{١٣} ، ا^{١٧} ، لو^{٢٨} ، بو^{٣٩}

٤ — اكتب معادلات التفاعل لتفاعلات (α ، ب) التى يكون فيها نوى الهدف (النواة الأصلية) هى : فو^{٣١} ، لو^{٢٧} ، ح^{١٩}

٥ — أكمل التفاعلات الآتية :

ا — لى^{٧} + ؟ ← ب^{١٠} + ن^{١}

ب — ح^{١٩} + يد^{١} ← ا^{١٦} + ؟

حـ — ك^{١٢} + يد^{١} ← ؟ + γ

د — ؟ + يد^{٢} ← لى^{٧} + هى^{٤}

هـ — ن^{١٤} + ؟ ← ن^{١٥} + يد^{١}

٦ — إذا كانت الزاوية المتوسطة لتشتت النيوترونات تشتتاً مرناً بذرات الأيدروجين هى ٤٥° فاحسب عدد التصادمات اللازمة لإنقاص طاقة النيوترون من ١ م . ا . ف إلى أقل من ١ ك . ا . ف (راجع الفقرة ٧ — ٤)

(الجواب : ١٠)

٧ — استخرج أربعة أمثلة للنوى الأيسوبارية (النوى التى تتحد فى عدد الكتلة ولكنها تختلف فى الشحنة النووية) من الجدول (د) .

مراجع مقترحة للاطلاع

"FOUNDATIONS OF NUCLEAR PHYSICS", New York, Dover Publication Inc. 1949.

تحتوى صفحة ١٣١ على صورة طبق الأصل من مقال « رذرفورد » الأصلى عن التحولات ، وهى خالية من الرياضيات وتحتوى صفحة ٥ على صورة طبق الأصل من مقال « شادويك » الأصلى عن اكتشاف النيوترون وهو سهل القراءة .

POLLARD E. & DAVIDSON W. L. "Applied Nuclear Physics," New York John Wiley & Sons 1942.

يعالج الباب الخامس تجارب التحولات بطريقة سهلة القراءة .

الفصل السابع والعشرون

القوى النووية والطاقة النووية

٢٧ ـ ١ القوى النووية

تعطينا تجارب الاستطارة بالنوى الخفيفة، فكرة عن حجم النواة، وعن الحدود التى يكون المجال الكهربى داخلها معززا بقوى نووية معينة . وتثبت التحولات النووية أن الجسيمات المشحونة العالية السرعة يمكنها اختراق هذه الحدود . كما أن انبعاث جسيمات ألفا وبيتا يبين أن العمليات النووية تؤدى أحياناً إلى عدم الاستقرار وانبعاث جسيمات مشحونة . فمن الواضح أنه توجد قوى نووية معينة مسئولة عن كل هذه الحقائق ، وعلينا أن نتقصى قوانين تلك القوى .

وموضوع القوى النووية لم يحل بعد ، ويعتبر أهم موضوع فى علم الفيزياء فى الوقت الحاضر . على أن طبيعة الموضوع واضحة ، ويمكن الإشارة إلى بعض مظاهرها هنا .

فنحن نعلم أنه لابد أن تكون هناك قوى جذب شديدة بين النكليونات وهذه القوى من نوع جديد تماماً . فهى ليست قوى كهربية إذ أن الديوترون الذى يتركب من بروتون موجب ونيوترون غير مكهرب يكون نواة مستقرة . وقوى الجاذبية أصغر بكثير من أن تفسر الاستقرار النووى ، ولا توجد أية قوة أخرى فى الفيزياء الذرية أو الكلاسيكية يمكنها أن تفسر الاستقرار النووى .

ولنأخذ مثلا ، جسيم ألفا للتدليل على شدة القوى النووية ، فبروتوناها اللذان يبعد أحدهما عن الآخر بمسافة تبلغ ٣×١٠^{-١٣}سم تقريبا، يتنافران بقوة كهربية تبلغ حوالى :

$$\frac{س^{٢}}{ر^{٢}} = \frac{(٤,٨ \times ١٠^{-١٠})^{٢}}{(٣ \times ١٠^{-١٣})^{٢}} = ٢,٦ \times ١٠^{٦} \text{ داين}$$

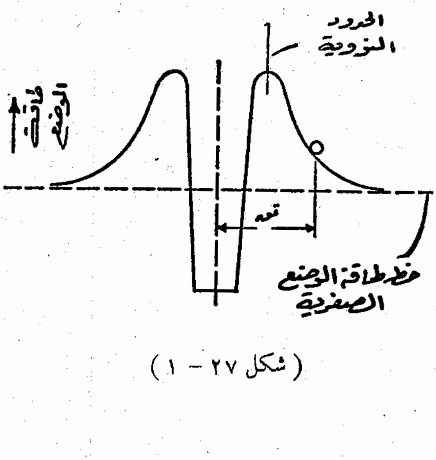
وهذه القوة تساوى فى المقدار قوة الجاذبية الأرضية على جسم كتلته ٢,٦ كيلوجرام ، فإذا كان لجسيم أن يحتفظ بكيانه ولا تتنافر مركباته ، فيلزم أن توجد قوة جذب نووية مساوية لهذا المقدار على الأقل .

ونحن نعلم أن القوى النووية يجب أن تكون قصيرة المدى ، فتأثيرها يكون ملموساً على مسافات تقع فى حدود الأبعاد النووية ، ويتلاشى بسرعة خارج تلك المسافات . وإذا لم يكن الأمر كذلك ، فإن تجارب تشتت جسيمات ألفا ما كانت لتتفق مع معادلة « رذرفورد » للتشتت الكهربى حتى فى الحالات التى تقترب فيها من النوى إلى مسافات صغيرة نوعاً ما . وتأثير المدى الصغير للقوى النووية هو تحديد للحدود النووية تحديدا واضحاً . فتوجد فى داخل النواة قوى جذب شديدة، تتلاشى بسرعة عند الحدود النووية ، أما القوى المؤثرة عند مسافات أبعد من ذلك ، فهى قوى كهربية صرفة .

لقد أدت هذه الآراء إلى نموذج مناسب لتمثيل القوة بين جسيم مشحون والنواة . فلنأخذ مثلا بروتونا يتفاعل مع نواة عددها الذرى ذ ، والبروتون يتحرك نحو النواة بطاقة حركة تبلغ عدة ملايين من الإلكترون فولت ، وتتحول طاقة الحركة إلى طاقة وضع (طاقة كامنة) باقترابه من النواة . وقيمة طاقة الوضع هذه هى (راجع الفقرة ٢٣ — ٤) :

$$ط = \frac{ش \, (ش \, ذ)}{ر}$$

عندما يكون البروتون ن على مسافة ر من مركز النواة . فالبروتون يعمل كما لوكان جسيما تثاقليا يتسلق جبلا ، وارتفاع الجبل يساوى $\frac{ثابت}{ر}$ (شكل ٢٧ — ١) . على أن الجبل لا يزداد ارتفاعه ازديادا لا نهائيا بتناقص ر ، إذ أن القوة تتغير فجأة عند



(شكل ٢٧ — ١)

الحدود النووية من تنافر إلى تجاذب ، وتنشأ فى الجبل حفرة عميقة تمثل القوى النووية الخاصة . وعلى ذلك فطاقة وضع البروتون المقترب من النواة يمكن تمثيلها ببركان فوهته النواة ذاتها ، فإذا أخذنا منسوب الأرض المحيطة بالبركان التى يبدأ من عندها الجبل فى الصعود كخط الصفر لطاقة الوضع . فإن المخروط البركانى يهبط إلى ما دون هذا المنسوب بمقدار يتوقف على شدة قوى التجاذب النووية . والبروتون المقترب من جبل طاقة الوضع يرتفع إلى منسوب يتوقف على طاقة حركته ثم يستطير من سفح الجبل إذا لم يتمكن من الوصول إلى فوهة البركان ، على أنه يمكنه الوصول إلى الفوهة إذا ما أعطى الطاقة الكافية ، (وأحكم تصويبه) وهذه الطاقة هى مدخل (أو بداية) الطاقة للتحول المستحث بالبروتون ، ويفشل النموذج ، بالطبع ، فى إفادتنا عما يحدث حينئذ . وربما نكون فى ذلك أطمع فيما هو أكثر من اللازم .

ونموذج جبل طاقة الوضع ليس بالسذاجة التى قد تتبادر إلى أذهاننا . فلقد استخدم فى تفسير الخصائص التى شوهدت بالتجربة لانبعاث جسيم ألفا من العناصر المشعة طبيعيا ، والمفروض فى هذه النظرية أن الحفرة تحتوى على جسيم ألفا تمثله موجة « دى برولى » للجسيم كنموذج لتداخل موجى ناشئ عن الانعكاسات الموجية من جوانب الحفرة . ويقابل انبعاث جسيم ألفا « تسرب » الموجة خلال حاجز الطاقة وتشكلها ثانية فى الخارج كعلبة موجية لجسيم ألفا طليق . واحتمال هذا التسرب صغير ، ولكنه محدد ويمكن حسابه بميكانيكا الكم . وهناك قانون تجريبى ، ينص على أن النوى التى تبعث جسيمات ألفا بطاقة كبيرة ، عمر نصفها قصير . وإذا أردنا تفسير ذلك طبقاً للنموذج الحالى نجد أن حاجز الطاقة يضيق عند القمة ، وأن احتمال التسرب يزداد للحواجز الضيقة ، بل إن النظرية تذهب إلى أبعد من ذلك ، فتعطى العلاقة الكمية الصحيحة بين طاقة جسيمات ألفا وعمر النصف فى حالة حفرة طاقة ذات اتساع وعمق مناسبين .

ويفسر نموذج جبل طاقة الوضع ، أيضاً ، الانحرافات عن استطارة رذرفورد التى شوهدت فى حالة النوى الخفيفة وجسيمات ألفا والبروتونات ذات الطاقة العالية ،

وهنا نلجأ إلى عكس انبعاث جسيم ألفا ، فموجة « دى برولى » للقذيفة العالية الطاقة تتسرب إلى داخل الحفرة حيث تتعدل الموجة المستطارة .

على أنه يجب ألا نفترض أن هذا النموذج نجح نجاحا تاما . فهو نموذج لطاقة الوضع يفسر التفاعل بين جسيم منفرد والنواة ، ولكنه لا يفسر طبيعة القوى النووية .

٢٧ ـ ٢ طاقة الربط النووية

ينشأ عن قوى الجذب الشديدة داخل النواة ترابط بين البروتونات والنيوترونات النووية . ويمكن وصف ذلك « بطاقة الربط » للنواة . . وهى تعرف بالطاقة التى يجب أن تعطى لنكليونات النواة لتنفصل عن بعضها البعض تماما. فهى بذلك شبيهة بطاقة الربط لذرة الأيدروجين التى نعرفها بأنها الشغل اللازم بذله لتحريك الإلكترون من مدار فى حالته الصفرية إلى ما لا نهاية .

ويمكننا الحصول على فكرة عامة عن قيمة طاقات الربط من طاقات الوضع المعروفة للبروتونات الناشئة عن تنافرها الكهربى . على أنه توجد ، لحسن الحظ ، طريقة دقيقة لتعيين طاقات الربط النووية تستخدم فيها قاعدة أينشتين لتكافؤ الطاقة والكتلة. فالنواة التى تتركب من نيوترونات وبروتونات أصغر فى الكتلة من مجموع كتل الجسيمات المكونة لها عندما يكون كل منها على انفراد . ويمثل هذا الفقد (أو النقص) فى الكتلة طاقة الربط طبقا لمعادلة أينشتين (٢٠ ـ ٢٣) .

$$\triangle \text{ط} = (\triangle \text{ك})\ \text{ث}^{٢}$$

حيث △ ك هى النقص فى الكتلة الناشىء عن الربط ، △ ط هى طاقة الربط . وواضح أن طاقة الربط هذه سالبة بالنسبة للطاقة الصفرية للجسيمات الطليقة .

واستخدام قاعدة أينشتين لتكافؤ الكتلة والطاقة ، يصلح بصفة خاصة فى قياس طاقات الربط النووية ، وذلك لكبر الطاقات وصغر الكتل التى تتضمنها تلك القياسات . ولقد تأكدت النتائج تجريبيا من المراجعات الدقيقة ومقارنة النتائج التى تم الحصول عليها من قياسات مطياف الكتلة ، وطاقات تفاعلات الجسيمات النووية ،

ومصادر أخرى متعددة . وسوف نناقش بعض هذه الأدلة فى هذا الفصل .

ولنأخذ كتلة ذرة الهيليوم ، كأول مثل فى هذا الصدد ، فهى تساوى ٤,٠٠٣٨٦ وحدة كتلة (الجدول « د » فى التذييل) طبقا للقياسات المأخوذة من مطياف الكتلة . (ملاحظة : من الأنسب استخدام الكتل الذرية فى تفاعلات الجسيمات ، بدلا من الكتل النووية ، وهذا مسموح ، إذ أن كتلة الإلكترون تتعادل فى شقى التفاعل) ومن المسلم بأن نواة الهيليوم تتكون من ٢ نيوترون + ٢ بروتون ، وعلى ذلك فكتلة هذه المركبات تساوى :

٢ (كتلة ذرة الأيدروجين) + ٢ (كتلة النيوترون) = ٢ × ١,٠٠٨١٣ + ٢ × ١,٠٠٨٩٤ = ٤,٠٣٤١٤ وحدة كتلة

وهذه الكتلة أكبر من كتلة الهيليوم المقيسة بمقدار ٤,٠٣٤١٤ — ٤,٠٠٣٨٦ = ٠,٠٣٠٢٨ وحدة كتلة ، ويؤخذ هذا النقص فى الكتلة على أنه طاقة الربط للنواة . وعلى العموم ، يسمى المقدار الذى تنقصه كتلة أى نواة عن مجموع كتل نكليوناتها الطليقة « بنقص الكتلة » ، فنقص الكتلة هو طاقة الربط للنواة معبرا عنها بوحدات الكتلة .

والآن لنحسب بعضا من « نقص الكتلة » (راجع الجدول « د » فى التذييل للحصول على الكتل الذرية) .

الديوترون ($_{1}$يد^{2}) : ١,٠٠٨١٣ + ١,٠٠٨٩٤ = ١,٠١٧٠٧ وحدة كتلة

الكتلة المقيسة = ٢,٠١٤٧٢

نقص الكتلة للنواة $_{1}$يد^{2} = ٠,٠٠٢٣٥

الأكسيجين ($_{8}$أ^{16}) : ٨×١,٠٠٨١٣+٨×١,٠٠٨٩٤=١٦,١٣٦٥٦ وحدة كتلة

الكتلة بالتعريف = ١٦,٠٠٠٠٠

نقص الكتلة للنواة ($_{8}$أ^{16}) = ٠,١٣٦٥٦

اليورانيوم ($_{92}$يو^{238}) : ٩٢×١,٠٠٨١٣+١٤٦×١,٠٠٨٩٤=٢٤٠,٠٥ وحدة كتلة

الكتلة المقيسية = ٢٣٨,١٣

نقص الكتلة للنواة ($_{92}$يو^{238}) = ١,٩٢

٢٧ ـ ٣ مبدأ تكافؤ الكتلة والطاقة لأينشتين

بالرغم من أن المعرفة بنقص الكتلة النووية حديثة الأصل ، وأنها نشأت مع القياسات الدقيقة للكتل الذرية ، ونموذج « البرتون والنيوترون » للنواة ، إلا أن السبب الأساسى لوجودها كان معروفاً منذ عام ١٩٠٥ حينما تقدم أينشتين بنظريته عن النسبية (الباب الحادى والعشرين) . ويتضح من هذه النظرية أن التغيرات فى الكتلة يجب أن تصحبها تغيرات فى الطاقة ، تماماً ، كما تنتج الحرارة عن الشغل الميكانيكى . على أن تكافؤ الطاقة والكتلة فى ظروف النسبية ، يظهر بوضوح فى النواة ، فى حين أنه غير محسوس تماماً فى فيزياء الأجسام الكبيرة ، أو حتى فى الفيزياء الذرية . ولكن ما السر فى ذلك ؟ لعل عملية حسابية بسيطة للطاقة لوحدة الكتل تزيد الأمر وضوحاً . فنقص الكتلة للنواة $_{٢}$هى^{٤} يساوى ٠,٠٣٠٢٨ وحدة كتلة ، وباستخدام قاعدة تكافؤ الكتلة والطاقة يمكننا التعبير عن هذا النقص فى الكتلة بوحدات الطاقة :

$$ط = ك ث^{٢}$$

$$= ٠,٠٣٠٢٨ \times ١,٦٦ \times ١٠^{-٢٤} (٣ \times ١٠^{١٠})^{٢}$$

$$= ٤,٥٢ \times ١٠^{-٥} \text{ إرج}$$

والطاقة التى تخص الجسيم الواحد فى نواة الهيليوم تساوى ربع هذا المقدار أى $١,١٣ \times ١٠^{-٥}$ إرج . والطاقة لوحدة الكتل تساوى $(١,١٣ \times ١٠^{-٥}) \div (١,٦٦ \times ١٠^{-٢٤})$ أى ٧×١٠^{١٨} إرج / جرام تقريباً . وهذا الرقم الأخير يمكن أن يقارن بالمقادير التى نقابلها فى فيزياء الأجسام الكبيرة (الماكروسكوبية) . فطاقة الوضع التثاقلية لكتلة ، مثلا ، تساوى ك ح ف ، والطاقة لوحدة الكتل تساوى ح ف ، فإذا أخذنا قيمة عادية للبعد ف ١٠٠ سم مثلا ، فإن هذه الطاقة تساوى $٩٨٠ \times ١٠^{٢} = ١٠^{٥}$ إرج / بجرام أى أقل منها فى الحالة النووية بحوالى $١٠^{١٤}$ مرة . وحتى فى حالة انطلاق الطاقة الكيموية فى المفرقعات تكون الطاقة لوحدة الكتل فى حدود $١٠^{١٢}$ أو $١٠^{١٣}$ إرج / جرام فقط . ويرجع السبب فى إمكاننا الكشف عن تكافؤ الكتلة

والطاقة فى التجارب النووية إلى كبر كمية الطاقة وصغر كتل النكليونات إلى حد كبير . وهذا التركيز الهائل للطاقة ظاهرة نووية .

وعلى الرغم من أنه من المعقول تماماً ، أن نتوقع أن يكون تكافؤ الطاقة والكتلة ملموساً فى الظواهر النووية ، إلا أن نظرية النسبية لا تعطينا أى تنبؤ بالكيفية التى تتحول بها طاقة الكتلة إلى صورة أخرى من صور الطاقة . فالجرام الواحد من الفحم يحتوى على ٤ × ١٠^١١ إرج فى صورة طاقة حرارية كامنة تنطلق بالأكسدة ، وطاقة كتلته تساوى ٩ × ١٠^٢٠ إرج أى تكافئ طاقة الحرارة فى ٢٥٠٠ طن من الفحم . وإذا أمكننا تحويل كتلة الفحم إلى طاقة حرارية ، فإننا نحصل على طاقة تساوى بليونى ضعف للطاقة الكيموية . ولكن الفيزياء فى الوقت الحاضر لا تعرف طريقة للتحويل التام للكتلة إلى صورة أخرى من صور الطاقة . ويدل وجود نقص الكتلة فى جميع النوى على أن تحولا جزئياً لابد أن يكون قد حدث فى الوقت الذى تكونت فيه النوى المستقرة . وما زلنا لا ندرى ما إذا كان من الممكن تقليد هذه العملية على نطاق صغير فى المعمل ، على أننا نلاحظ فى كثير من عمليات « تحول العناصر صناعياً » تحول جزء صغير من الكتلة النووية الكلية إلى طاقة حركة (راجع الفقرة ٢٧ ــ ٥) ، فلدينا ، إذن ، وسيلة لتحول الكتلة .

٢٧ ــ ٤ حساب طاقات الربط

على الرغم من أنه لا يمكننا مناقشة الكيفية التى تتحول بها طاقة الكتلة فى النواة إلى صور الطاقة الأخرى (لاحظ أنه من الخطأ الكلام عن تحول الكتلة إلى طاقة ، إذ أن الكتلة هى صورة من صور الطاقة) إلا أنه فى إمكاننا أن ندرس نتائج هذا التحول . فحيث إن نواة الهيليوم ، مثلا ، تزن أقل من نيوترونين طليقين + بروتونين طليقين ، فيلزمنا لإجراء تجربة لتفتيت نواة الهيليوم ، أن نزود النواة بهذه الزيادة فى الكتلة قبل أن تتحرر الجسيمات . وعلى ذلك فيتطلب فصل نكليونات الهيليوم

طاقة تكافئ نقص الكتلة لها . فلابد أن تكون هذه الطاقة ، إذن ، هى التى تعمل على تماسك النواة .

ولإجراء هذا الحساب عددياً ، نبدأ فى حساب العلاقة بين الطاقة بوحدات الكتلة ووحدات الإلكترون ڤولت

$$ط = ك ث^{٢}$$

فإذا كانت ك = ١ وحدة كتلة = ١,٦٦ × ١٠ ^{٢٤} جرام

∴ ط = ١,٦٦ × ١٠$^{-٢٤}$ × (٣ × ١٠^{١٠})^{٢} إرج

= ١٤,٩٤ × ١٠$^{-٤}$ إرج

ولكننا رأينا من الفقرة ١٧ — ١٠ أن :

١٦ × ١٠$^{-١٣}$ إرج = ١ إلكترون ڤولت

∴ طاقة وحدة الكتلة = (١٤,٩٤ × ١٠$^{-٤}$) — (١٦ × ١٠$^{-١٣}$)

= ٩٣١ × ١٠^{٦} إلكترون ڤولتات

أى أن وحدة الكتلة = ٩٣١ م . ا . ف

وبتطبيق ذلك على نواة الهيليوم نجد :

طاقة الربط (= نقص الكتلة) = ٠,٠٣٠٢٨ وحدة كتلة

= ٠,٠٣٠٢٨ × ٩٣١ م . ا . ف

= ٢٨,٢ م . ا . ف

وعلى الرغم من أننا لا نعرف نوع القوى التى تمسك النواة بعضها ببعض فإننا عينا طاقة الربط ، ولقد جاءت هذه الطاقة على حساب طاقة الكتلة . ويمكننا أن نلمس ضخامة طاقات الربط فى النوى بمقارنتها بطاقات الربط للجزيئات . فنحن ننظر للماء ولملح الطعام وللكثير من المركبات الكيموية الشائعة على أنها مواد مستقرة يمكنها أن تتحمل الكثير من العنف فى المعاملة (من ناحية الطاقة) وتبقى حافظة لتركيبها ، إلا أن طاقات الربط الجزيئية تقع جميعها فى حدود من ١ إلى ١٠ إلكترون ڤولت . وبمقارنتها بطاقات الربط النووية نجد أن الأخيرة تفوقها بملايين المرات .

٢٧ ــ ٥ موازنه الطاقة فى التفاعل النووى

من الواضح أن قانون بقاء الكتلة لم يعد صحيحاً فى أغلب التفاعلات النووية ، إذ أن النواة تتحول فى التفاعل وتنطلق طاقة الحركة أو تمتص فى التغير فى الكتلة أثناء التفاعل . وعلى ذلك فلا تخضع طاقة الحركة ، بالمثل ، لقانون البقاء . إلا أن الكتلة الكلية زائداً الكتلة المكافئة لطاقات الحركة تظل ثابتة طبقاً لقانون بقاء الطاقة. وسوف نوضح هذا البقاء بتحليل عدة حالات. فلنأخذ ، مثلا ، تفاعلا جسيمياً ، فإذا افترضنا أن طاقة الحركة لنواة الهدف يمكن إهمالها (إذ أنها ساكنة افتراضياً بالنسبة للقذيفة الجسيمية المتحركة بسرعة كبيرة) فتكون موازنة الطاقة كما يلى :

(طاقة الحركة للقذيفة الجسيمية) + طاقة الكتلة للقذيفة الجسيمية + (طاقة الكتلة لنواة الهدف) = (طاقة الحركة للجسيم المنبعث) + (طاقة الحركة للنواة المتبقية) + (طاقة الكتلة للجسيم المنبعث) + (طاقة الكتلة للنواة المتبقية) .

وواضح تماماً ، أنه يمكننا كتابة هذه المعادلة بحيث تكون جميع طاقات الكتلة وطاقات الحركة بوحدات المليون إلكترون ڤولت أو تكون جميعها بوحدات الكتلة . وحيث إن الكتل هى السائدة فى المعادلة فمن الأسهل عادة أن نعبر عن طاقة الحركة بوحدات الكتلة بدلا من أن نعبر عن طاقة الكتلة بوحدات م . ا . ف

والآن لنطبق قانون بقاء الطاقة على تفاعل رذرفورد الأصلى $_{7}$ن^{14} × (الفا ب) $_{8}$ا^{17} ونلاحظ أن طاقة حركة جسيم ألفا الساقط كانت فى هذه التجربة ٧,٧ م . ا . ف ، فالطرف الأيمن للمعادلة يصبح :

طاقة الحركة لجسيم ألفا	٠,٠٠٨٣	وحدة كتلة (= ٧,٧ ÷ ٩٣١)
كتلة جسيم ألفا	٤,٠٠٣٩	وحدة كتلة
كتلة النواة $_{7}$ن^{14}	١٤,٠٠٧٥	
الطاقة الكلية الداخلة	١٨,١٠٩٧	وحدة كتلة

والآن لنر ماذا فى الطرف الأيسر ، فنحن لا نعرف شيئا عن طاقة الحركة للبروتون أو للنواة ا^{17} ، فلنرمز لمجموعهما بالرمز ح

كتلة النواة $_{8}$ا^{17} = ١٧,٠٠٤٥ وحدة كتلة

كتلة النواة $_{1}$يد^{1} = ١,٠٠٨١

مجموع طاقتى $_{1}$يد^{1} ، $_{8}$ا^{17} = ح

الطاقة الكلية الخارجة = ١٨,٠١٢٦ + ح وحدة كتلة

وعلى ذلك تكون ١٨,٠١٩٧ = ١٨,٠١٢٦ + ح أى ح = ٠,٠٠٧١ وحدة كتلة أو ح = ٩٣١,٠٠٧١ = ٦,٦ م . ا . ف . ويتقاسم هذه الطاقة المنطلقة أثناء التفاعل والبالغة ٦,٦ م . ا . ف كل من النواة ا^{17} المتبقية والبروتون المنبعث ويغنم البروتون بأغلبها نظراً لصغر كتلته . ويبلغ نصيب الإلكترون حوالى $\frac{16}{17}$ من هذه الطاقة تقريباً . (يمكن حساب كيفية تقسيم الطاقة ح بالضبط باستخدام قانون بقاء كمية التحرك) . ولعلنا نلاحظ هنا أن طاقة الحركة التى زود بها التفاعل كانت ٧,٧ م . ا . ف ، وطاقة الحركة التى انطلقت كانت ٦,٦ م . ا . ف . فقط ، فيعطينا ذلك ، مثالا لتحول طاقة الحركة إلى طاقة كتلة . فإذا كانت طاقة الحركة لجسيم ألفا الساقط أقل من ١,١ م . ا . ف (= ٧,٧ — ٦,٦) ، لم يكن للتفاعل أن يتم على الإطلاق ويسمى مثل هذا التفاعل أحيانا إندوثرمى (أى أنه تفاعل يلزم لإتمامه امتصاص طاقة) ، وقد استعير هذا اللفظ من الكيميا حيث يعبر فيها عن التفاعل الذى يستلزم امتصاص طاقة حرارية .

والآن لنحسب موازنة الطاقة التى تتضمنتها تجربة « شادويك » ، وبذلك نكون قد سقنا مثلا آخر لتطبيق قانون بقاء الطاقة . فى هذه التجربة قذف البريليوم بجسيمات ألفا ذات الطاقة ٥,٣ م . ا . ف ليعطى التفاعل $_{4}$بى^{9} (الفا ن) $_{6}$ك^{12} ، وتصبح موازنة الطاقة كما يلى :

طاقة الحركة لجسيم ألفا = ٠,٠٠٥٧ وحدة كتلة (= ٥,٣ ÷ ٩٣١)

كتلة النواة $_{6}$ك^{12} = ١٢,٠٠٣٩

كتلة النواة $_{2}$هى^{4} = ٤,٠٠٣٩ كتلة النيوترون = ١,٠٠٨٩

كتلة النواة $_{4}$بى^{9} = ٩,٠١٥٠ طاقة الحركة للنيوترون + $_{6}$ك^{12} = ح

الطاقة الداخلة = ١٣,٠٢٤٦ الطاقة الخارجة = ١٣,٠١٢٨ + ح

وبذلك تكون ح= ١٣,٠٢٤٦ – ١٣,٠١٢٨ = ٠,٠١١٨ = ٠,٠١١م. ا. ف ، ونجد فى هذه الحالة أن طاقة الحركة المعطاة كانت ٥,٣ م . ا . ف ، وطاقة الحركة المكتسبة كانت ١١,٠ م . ا . ف . . أى أن طاقة الكتلة تحولت إلى طاقة حركة فى التفاعل . ويطلق على مثل هذا التفاعل اسم « إكسوثرمى » (أى تفاعل تنتج عنه طاقة) .

ولنأخذ التفتت الفوتونى للديوترون كمثل لبقاء الطاقة فى تفاعل تستخدم فيه فوتونات أشعة جاما كأداة القذف بدلا من الجسيمات ، وهذا التفاعل مهم جدًّا ، ومنه نعين كتلة النيوترون ومعادلته كما يلى :

γ + ${}_{1}\text{يد}^{2}$ ⟵ ${}_{1}\text{يد}^{1}$ + ${}_{0}\text{ن}^{1}$

ونفرض هنا أن كتلة النيوترون تساوى تقريباً كتلة البروتون ، وأن قيمتها الصحيحة غير معروفة بالضبط ، والفوتون يزود الديوترون بالطاقة الكافية لتعويض طاقة الربط فيه ، بالإضافة إلى المزيد من الطاقة التى تظهر على صورة طاقة حركة للنيوترون والبروتون المنبعثين . وحيث إن هذين الجسيمين متساويان تقريباً فى الكتلة ، فإنهما يتقاسمان طاقة الحركة مناصفة بينهما عند التحلل . وعلى ذلك تقاس طاقة البروتون من تأيينه الكلى أو مداه ، وتؤخذ طاقة الحركة الكلية على أنها ضعف طاقة البروتون هذه . وباستخدام أشعة جاما ذات الطاقة ٢,٦٢ م . ا . ف ، المنبعثة من التاليوم المشع طبيعيا ${}_{81}\text{ثا}^{209}$ (ث حَ) ، نجد أن طاقة حركة البروتون تساوى ٠,٢٢ م. ا . ف . وبتطبيق قانون البقاء نحصل على :

كتلة الطاقة $h\ \nu$ = ٠,٠٠٢٨٢ وحدة كتلة (= ٢,٦٢ ÷ ٩٣١)

كتلة النواة ${}_{1}\text{يد}^{2}$ = ٢,٠١٤٧٢

٢,٠١٧٥٤ وحدة كتلة

كتلة النواة ${}_{1}\text{يد}^{1}$ ١,٠٠٨١٣ وحدة كتلة

كتلة طاقة الحركة ٠,٠٠٠٤٧

كتلة النيوترون ${}_{0}\text{ن}^{1}$

١,٠٠٨٦٠ + ${}_{0}\text{ن}^{1}$

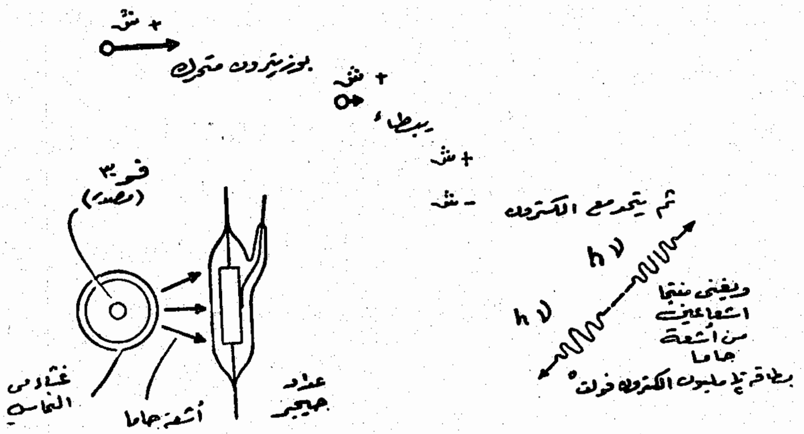
ومن ذلك نجدأن ن¹ = ٢,٠١٧٤٥ − ١,٠٠٨٦٠ = ١,٠٠٨٩٤ وحدة كتلة وهى كتلة النيوترون، ومن ثم فطاقة الربط للديوترون تساوى :

(١,٠٠٨٩٤ + ١,٠٠٨١٣) − ٢,٠١٤٧٢ = ٠,٠٠٢٣٦ وحدة كتلة = ٢,٢٠ م . ا . ف

وواضح أن الفوتونات التى تقل طاقتها عن ٢,٢٠ م . ا . ف لا تحدث تفككاً للديوترون .

٢٧ ـ ٦ فناء البوزيترون

يعتبر فناء البوزيترونات من الأمثلة المدهشة للغاية ، لتحول طاقة الكتلة إلى صورة أخرى من صور الطاقة ، فالبوزيترون ، كما نذكر ، يتولد من التحول البروتونى النيوترونى فى النواة المشعة صناعيا ، إلا أن البوزيترون لا يوجد ككيان ذاتى طليق فى الطبيعة، ومن الحكمة أن نتساءل عن مصيره .



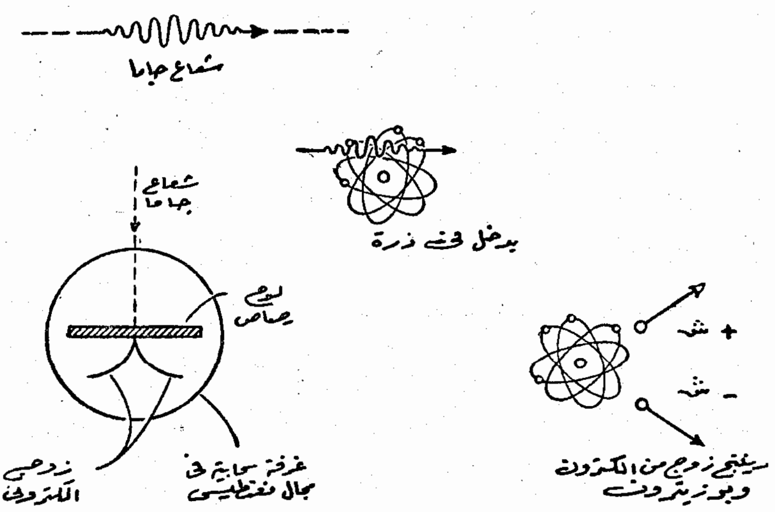
(شكل ٢٧ - ٢)

لنفرض أننا لففنا كمية صغيرة من الفسفور المشع فى صفيحة رقيقة من النحاس ذات سمك يكفى لمنع البوزيترونات من النفاذ منها (شكل ٢٧ ـ ٢) ، وأننا وضعنا بالقرب منها عداد جيجر حساسا لأشعة جاما . وبالرغم من أن الفسفور فو٣٠

يشع بوزيترونات إلا أنه لايصحب ذلك أشعة جاما ، على أنه إذا اعترضت المسار صفيحة رقيقة من النحاس فإن عداد جيجر يسجل أشعة جاما ، ولقد بينت التجارب المتعددة أن الإلكترونات والبوزيترونات عديمة النفع إلى حد كبير ، كوسائل للتصادم النووى ، وعلى ذلك فيجب أن نستبعد احتمال أن أشعة جاما تولدت فى نوى النحاس . وينبغى لنا ، بدلا من ذلك ، أن ننظر إلى البوزيترون ذاته على أنه مصدر لأشعة جاما . والعملية هى تحول طاقة الكتلة إلى طاقة كهرومغنطيسية . فتنخفض سرعة البوزيترون نتيجة لتصادماته فى الصفيحة النحاسية . ويصادف فى النهاية إلكترونا (من إحدى ذرات النحاس) ، فيتحد الاثنان ويفنيان معا ، وتتحول طاقة الكتلة إلى فوتونين يتحركان فى اتجاهين متضادين ليحفظا كمية التحرك (شكل ٢٧ — ٢) ولا يمكن للبوزيترون المنفرد أن يفنى من نفسه ، إذ يمنع من ذلك قانون بقاء الشحنة الكهربية . وبتطبيق قانون بقاء الطاقة على زوج الإلكترون والبوزيترون يمكننا التنبؤ بطاقات أشعة جاما (ونهمل هنا طاقة حركة كل من الإلكترون والبوزيترون الصغيرة) .

ك ث^{2} + ك ث^{2} = $h\nu + h\nu$

+ ش — ش



(شكل ٢٧ — ٣)

وكتلة الإلكترون الموجب تطابق كتلة الإلكترون السالب وكل منهما تساوى ٩,١ × ١٠^-٢٨ جرامات وعلى ذلك تصبح :

$$2 \times h\nu = ٢ \text{ ك ث}^2$$

وبذلك تكون الطاقة لكل من الفوتونين مساوية لطاقة كتلة أحد الإلكترونين

ط = ك ث^٢ = ٩,١ × ١٠^-٢٨ × (٣ × ١٠^١٠)^٢

= ٨١,٩ × ١٠^-٨ إرج

= ٠,٥١ م . ا . ف = طاقة كل من فوتونى أشعة جاما.

ويمكن قياس طاقة أشعة جاما بوضع ألواح من الرصاص معروفة السمك فى طريقها لتمتصها . وتؤكد النتائج تماما الصورة التى قدمناها للفناء البوزيترون . ومن ثم فحياة البوزيترون قصيرة وتنتهى بدخوله فى اقتران فنائى مع إلكترون لتكوين فوتونين لأشعة جاما .

٢٧ ــ ٧ إنتاج أزواج الألكترونات

طالما تساءلنا فى الفيزياء ، عما إذا كانت ظاهرة معينة تحدث بالعكس . ويتخذ هذا السؤال فى حالتنا الراهنة الصورة التالية . هل يمكن لأشعة جاما أن تنقلب إلى إلكترون موجب وآخر سالب ؟ (فقانون بقاء الشحنة الكهربية يستلزم إنتاج الاثنين معا) ، ولكى نخلق كتلة إلكترون واحد يلزمنا ٠,٥١ م . ا . ف من الطاقة . فيجب أن تكون طاقة فوتون جاما إذن ١,٠٢ م . ا . ف ، على الأقل ، لكى يولد منه زوج من الإلكترونات . ولقد شوهد إنتاج الأزواج الإلكترونية هذا بالفعل ، والشرط الوحيد لحدوثه بالإضافة إلى الطاقة هو وجود نواة (شكل ٢٧ ــ ٣) . أى أن فوتون جاما لا يمكن أن ينتج زوجا من الإلكترونات فى الفراغ دون اعتبار إلى طاقته . على أنه عندما ينفذ فى المادة ويقترب من إحدى النوى قربا كافيا يمكنه إنتاج زوج من الإلكترونات طاقتاهما متساويتان وتسيران فى اتجاهين متضادين . وليس هذا ممكنا فحسب ، بل إن هذه هى الكيفية الأكثر احتمالا

لامتصاص أشعة جاما التى تبلغ طاقتها عدة ملايين من الإلكترون فولت فى المادة ، وبالطبع يفنى البوزيترون الذى يتولد فى هذه العملية فى الحال . ولقد شوهدت البوزيترونات الناتجة عن أشعة جاما لأول مرة عام ١٩٣٢ .

مسائل :

(يرجع إلى الجدول « د » فى التذييل للحصول على كتل النظائر)

١ ــ احسب طاقة الربط للتريتون (يد^{٣})

الجواب : ٨,٣٩ م . ا . ف

٢ ــ احسب طاقة الربط لكل نكليون فى النوى الآتية : هى٤ ، ا^{١٦} ، مجو^{٤٠} ، نح^{٦٣} (٦٢,٩٥٧) ف^{١٠٩} (١٠٨,٩٤٩) ، ذ^{١٩٧} (١٩٧,٠٣٩) ، يو^{٢٣٨} (٢٣٨,١٣١) . أى من هذه النوى أكثر استقرارا ؟

٣ ــ احسب الطاقة المنطلقة فى التفاعلات الآتية :

(ا) ك^{١٢} (د، ب) ك^{١٣} طاقة الديترون (د) = ٤,٥٠ م . ا . ف

(ب) ب^{١١} (ن ، الفا) لى^{٧} طاقة النيوترون (ن) = ٨,٢٦ م . ا . ف

٤ ــ إذا كانت طاقة جسيمات ألفا المتيسرة للتفاعل ك^{١٣} (الفا ، ن) ا^{١٥} هى ٧,٧ م . ا . ف ، فهل يمكن حدوث هذا التفاعل من ناحية موازنة الطاقة ؟

٥ ــ اقترح ثلاثة أهداف تصلح لإنتاج ن^{١٦} المشع . بفرض توافر جسيمات القذف ب ، ن ، د ، ألفا بالطاقة الكافية .

٦ ــ احسب النهاية العظمى لطاقة جسيمات بيتا المنبعثة من تحلل النيوترونات الطليقة . (بإهمال طاقة الارتداد الصغيرة للنواة المتبقية) (ملحوظة : الكتل التى تؤخذ هى فى العادة الكتل الذرية كما هو وارد فى الجدول « د »

الجواب : ٠,٧٥ م . ا . ف

٧ ـ احسب أقل طاقة لازمة للتفكك الفوتونى لجسيم ألفا إلى المنتجات الآتية :

يد^{٣} + يد^{١}	الجواب ١٩,٨ م . ا . ف
يد^{٢} + يد^{٢}	الجواب ٢٣,٨ م . ا . ف
هى^{٣} + ن^{١}	الجواب ٢٠,٦ م . ا . ف
٢ يد^{١} + ٢ ن^{١}	الجواب ٢٨,٢ م . ا . ف

٨ ـ أى نواة من النوى المعروفة ذات عدد الكتلة الذرية ٢٣ لها أكبر طاقة ربط (راجع الجدول د) .

مراجع مقترحة للاطلاع

MILLIKAN, R.A., "ELECTRONS (+ & —)" Chicago, University of Chicago Press, 1947.

يعطينا الباب الرابع عشر فصلا عن اكتشاف البوزيترون وخواصه

POLLARD E. DAVIDSON, W. L., "Applied Nuclear Physics" New York, John Wiley Sons 1942.

يناقش الفصل الخامس موازنة الطاقة والكتلة فى التفاعلات النووية .

الفصل الثامن والعشرون

معجلات الجسيمات

٢٨ ـ ١ الجسيمات التى تصلح كقذائف

تزودنا المصادر المشعة طبيعيًّا ، بجسيمات ألفا ذات طاقة عالية يمكن استخدامها كقذائف فى دراسة التفتت النووى ، إلا أنه يحد من كفاءة هذه المصادر عاملان على الأقل : فهى مصادر ضعيفة الإنتاج للجسيمات ، وطاقة هذه الجسيمات تحددها النواة المنبعثة منها ، ولا يمكن زيادتها .

وتحدث التحولات النووية بوساطة الإلكترونات أو أشعة جاما فى أحوال خاصة فقط ، فتتطلب هذه العمليات جسيمات ثقيلة مثل جسيمات ألفا ، على أن البروتونات (النوى $_1$يد^1) والديوترونات (النوى $_1$يد^2) تفوق جسيمات ألفا كثيرا فى التأثير ، فهى جميعا متقاربة فى الكتلة ولكن شحنة كل من البروتون والديوترون الموجبة عبارة عن وحدة واحدة لا وحدتين كما هى الحال فى جسيم ألفا ، ومعلوم أن هذه الشحنة الموجبة تتسبب فى تنافر القذيفة مع النواة . وتوجد وسائل متعددة لإنتاج هذه الجسيمات بطاقة عالية صناعيًّا فى المعمل ، وتسمى هذه الوسائل « معجلات الجسيمات » ، وسوف نصف فى هذا الباب أكثر هذه المعجلات شيوعاً .

المعجلات الخطية

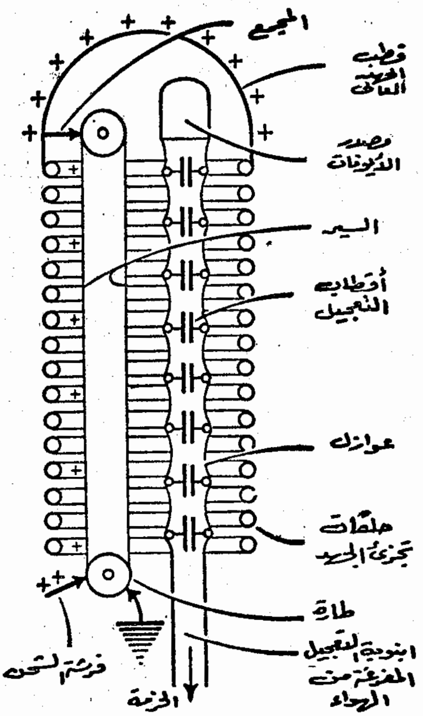
إن أوضح طريقة لتعجيل الجسيمات المشحونة هى السماح لها بالحركة فى الفراغ تحت تأثير فرق فى الجهد بين قطبين ، أحدهما متصل بالأرض والآخر مرفوع إلى جهد مستمر عال . ويوضع مصدر الأيونات بالقرب من أحد القطبين ، وقد يستعاض عن ذلك بعدة أقطاب يتدرج الجهد عليها . وتسمى الأجهزة التى تتحرك فيها الجسيمات المعجلة فى مسار مستقيم مخترقة منطقة مجال كهربى كبير واحد أو أكثر ، بالمعجلات « الخطية » .

وواضح أن تزويد بروتون أو ديوترون بطاقة ٢ م . ا . ف ، يتطلب فرق جهد قدره مليونا فولت . (وهذا الفرق فى الجهد ذاته يزود جسيم ألفا بطاقة ٤ م . ا . ف ، إذ أن شحنته ضعف شحنة البروتون أو الديوترون) ، ويمكننا أن نتصور صعوبة الحصول على هذه الجهود العالية والمحافظة عليها بحيث يمكن التحكم فيها باستمرار . ولقد استخدمت لهذا الغرض الطرق الواضحة مباشرة ، كاستخدام المحولات الكهربية لرفع الجهد والمقوِّمات ، ولكن نشأت أسباب فنية حدّت من الجهد الذى يمكن الوصول إليه بحيث لم يتجاوز مليون فولت .

ولقد كان أنجح معجل خطى ثابت الجهد من اختراع : « فان دى جراف » عام ١٩٣١. وتنتج هذه الآلة فرق الجهد بنقل الأيونات أو الإلكترونات ذاتها من الأرض إلى موصل معزول ، ويتم ذلك بحمل الشحنات على سير متحرك . ولما كانت هذه العملية إلكتروستاتيكية فى أساسها ، فغالباً ما يطلق على الآلة اسم « المولد الإلكتروستاتيكى » أو « المعجل الإلكتروستاتيكى »، ونجد فى شكل ٢٨ — ١ توضيحاً لتفصيلات هذا المولد ، فيمر السير العازل (المصنوع من المطاط أو الألياف الصناعية) أمام مجمع على شكل فرشاة فى أسفل المولد . وتعمل مجموعة من البطاريات أو مولد على حفظ جهد الفرشاة موجباً ، فينشأ تفريغ غازى « يكون السير فيه هو الكاثود) ، وبذلك تجمع الفرشاة الإلكترونات من السير أثناء مروره أمامها . وعندما يصل السير إلى قمة مساره يقابل مجمعاً آخر متصلا بموصل أجوف اتصالا مباشراً ، ويأخذ السير الإلكترونات من الكرة ليسد نقصه منها جزئياً . وبذلك تكتسب الكرة شحنة موجبة ، ويتصل السير بالأرض فى رحلة عودته قبل أن يبدأ دورته مرة ثانية . ويحد من الشحنة والجهد النهائيين اللذين يمكن للموصل الكرى الأجوف أن يرفع إليهما ، تسرب الكهربية إلى الهواء وخلال العوازل المقام عليها . ولكى نعمل على الإقلال من هذا التسرب توضع المجموعة كلها عادة فى إناء محكم يحتوى على غاز تحت ضغط عال يزيد قوة العزل للمجموعة .

وتركب فى داخل العمود المقام عليه الموصل أنبوبة التعجيل المحكمة بحيث تسمح بتفريغها من الهواء إلى درجة عالية جدا . وتتركب هذه الأنبوبة من مجموعة من الموصلات الأسطوانية (الأقطاب المعجلة) يفصلها عن بعضها أسطوانات عازلة .

ويتوزع الجهد توزيعاً منتظماً على طول هذا التركيب ، ويتم ذلك عادة بالاستعانة بتفريغ كهربى غازى بين أزواج متتابعة من الموصلات موضوعة خارج أنبوبة التعجيل (انظر شكل ٢٨ — ١) . وينشأ داخل الأنبوبة المفرغة فرق جهد بين الموصلات المتتابعة مجموعه يساوى فرق الجهد بين الموصل العلوى والأرض . وتستخدم هذه الموصلات لتجزئة الجهد الكلى ، وذلك لتجنب وجود فرق جهد كبير عبر عازل واحد ، هذا من ناحية ، ولتركيز الحزمة وتحديدها من ناحية أخرى ، ويدخل الأيدروجين أو الديوتيريوم أو الهيليوم المتأين الأنبوبة عند قمتها حيث يعجل نحو القاع ، وتمر حزمة الجسيمات المعجلة فى ثقب



(شكل ٢٨ — ١)

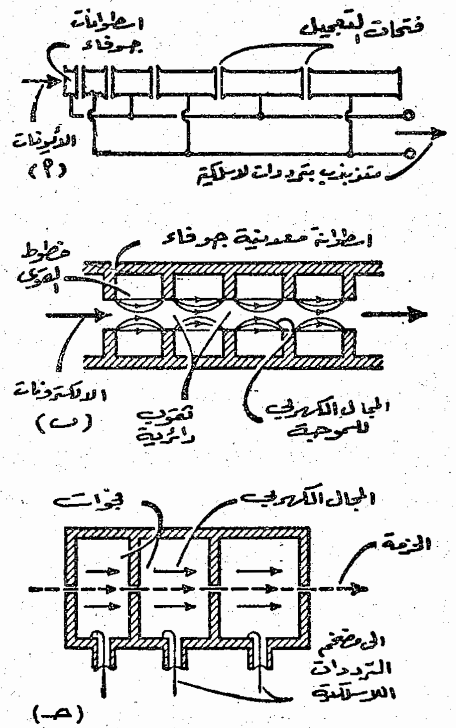
صغير فى الموصل السفلى لتصدم الهدف . وعملية تأيين الأيدروجين ، أو الديوتيريوم ، أو الهيليوم فى البداية عملية بسيطة نسبية . فتصوب عبر سريان الغاز حزمة إلكترونات محلية معجلة (تكفى طاقة قدرها ٢٠٠ إلكترون فولت ،) فتصدم الإلكترونات جزيئات الغاز ، وتتسبب فى تفككها إلى مركباتها الذرية وتتسبب كذلك فى تأيين بعض هذه الذرات . وينبغى أن يكون سريان الغاز بطيئاً باستمرار ، وذلك للمحافظة على التفريغ الجيد فى أنبوبة التعجيل . ويعمل ذلك على تجنب الانهيار الكهربى داخل الأنبوبة ، كما أنه يعمل على عدم تشتت الحزمة بذرات الغاز .أما التفريغ الجيد من الهواء ، فتستخدم للمحافظة عليه ، مضخة تفريغ سريعة متصلة بالأنبوبة .

ومزايا هذا المعجل كثيرة ، فهو يمدنا بحزمة عالية الشدة من البروتونات أو

الديوترونات ، أضف إلى ذلك أنه يمكن معرفة طاقة الجسيم بالضبط من معلومية فرق الجهد بين طرفى الأنبوبة . فمن الممكن الحصول على حزمة من البروتونات أو الديوترونات تصل شدة التيار فيها إلى عدة ميكر أمبيرات ، وإذا تذكرنا أن شحنة البروتون أو الديوترون تساوى ١٦×١٠^{-٢٠} كولوم ، وأن الكلوم الواحد يحتوى على $\frac{١}{١٦} \times ١٠^{٢٠}$ من هذه الشحنات ، وأن الميكرو أمبير هو $١٠^{-٦}$ كولوم فى الثانية ، يتضح لنا أن الميكرو أمبير من البروتونات يعنى $\frac{١}{١٦} \times ١٠^{١٤} = ٦٫٧ \times ١٠^{١٢}$ بروتونات تسقط فى الثانية الواحدة على الهدف . فلو سلمنا بأن التوجيه لإصابة نواة غير مضبوط ، فلا تزال هناك فرصة كبيرة لإصابة مليون نواة أو أكثر فى الثانية . وللحصول على عدد مساو لهذا العدد من جسيمات ألفا من مصدر راديوم ، يلزمنا عدة جرامات من الراديوم . . أى جزء كبير من كمية الراديوم الكلية الموجودة على سطح الأرض . على أن الصعوبات العملية الكثيرة فى توليد الملايين المتعددة من الفولت والتحكم فيها ، وفى تجنب انهيار العزل ، والتسرب ، كل هذه العوامل قد تضافرت لوضع حد أعلى قدره حوالى ١٠ م . ا . ف للطاقات التى يمكن الحصول عليها من النوع الاستاتيكى للمعجلات الخطية .

ويجرى الآن العمل بنشاط للوصول إلى نوع جديد من المعجلات الخطية ولو أن فكرته الأساسية كانت قد تمت دراستها والتحقق منها منذ عام ١٩٣١ بمعرفة « سلون ولورنس » . والفكرة فى هذه الآلة هى تزويد مجموعة من الأقطاب بجهود مترددة ، وترتب تلك الأقطاب بحيث يتسارع الجسيم فى فتحات التعجيل عندما تكون المجالات الكهربية فى الاتجاه الصحيح للتعجيل . (تحمى الجسيمات من المجالات أثناء نصف الدورة التى تكون فيها العجلة تناقصية ، أو يستعاض عن ذلك بتأخير زمنى فى رفع الجهد المتردد عبر الفتحات المتتابعة حتى تلتقط الفتحة الجسيم أثناء جزء الدورة التى تكون فيه العجلة تزايدية) وتتصل الموصلات المتتابعة فى آلة سلون ولورنس (شكل ٢٨ ــ ٢ ا) بخط نقل قوى يحمل طاقة موجية يقع ترددها فى حدود الموجات اللاسلكية الإذاعية . هذا ، وتنتشر الموجة فى أحد النماذج الحديثة لهذه الآلة ، فعلا ، فى هذا التركيب الذى تعجل فيه الجسيمات « ويسمى دليل الموجة » (شكل ٢٨ ــ ٢ ب) .

وهناك نوع آخر من المعجلات الخطية ذات تردد يقع فى حدود تردد الموجات اللاسلكية تستخدم فيه التجاويف حيث تعمل عملا شبيهاً بعمل المحولات الكهربية فى إنتاج جهود عالية جدا من جهود منخفضة صادرة عن مضخمات إلكترونية . (شكل ٢٨ – ٢ حـ) ويجرى العمل فى بعض هذه الآلات لتعجيل الإلكترونات حتى تصل طاقاتها إلى حدود البليون إلكترون ڤولت .



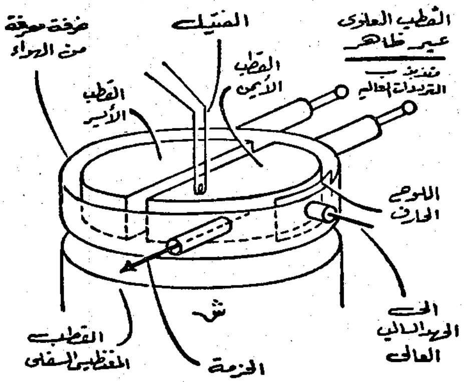
(شكل ٢٨ – ٢)

٢٨ – ٣ السيكلوترون

يعتبر السيكلوترون من أنجح الوسائل فى تعجيل البروتونات ، والديوترونات وجسيمات ألفا ، ولقد تم اختراعه على يد ا . و . لورنس عام ١٩٣٢ ، وتكمن مزاياه – مثله فى ذلك مثل المعجل الخطى ذى التردد العالى (تردد الموجات اللاسلكية) – فى قدرته على جعل الجسيم يتعرض لفرق جهد صغير عدة مرات ، مجمعاً ، أثناء ذلك ، طاقة تكافئ فرق جهد كبير ، ويستخدم ، لإجراء ذلك ، مجال مغنطيسى ليثنى مسارات الجسيمات على شكل دوائر ويرجع هذه الجسيمات ثانية إلى منطقة فرق الجهد ، لتحصل على المزيد من الطاقة (معجل دائرى) .

ويوضح (شكل ٢٨ – ٣) الأجزاء الرئيسية للسيكلوترون ، فيسلط فرق جهد متردد على القطبين الأجوفين اللذين على شكل D ، والمثبتين فى مستوى أفقى بحيث يواجه أحدهما الآخر . وتستخدم حزمة مستعرضة من الإلكترونات عند مركز هذا التركيب

لتؤين الغاز . فإذا افترضنا أنه تكونت بضعة أيونات أيدروجين بين القطبين ، وكان ذلك فى اللحظة التى كان فيها جهد القطب الأيمن سالباً بالنسبة للقطب الأيسر وفرق الجهد بينهما ٥٠٠٠٠ ڤولت ، نجد أن البروتون يتحرك فى مستوى أفقى عبر الفتحة بين القطبين مكتسباً فى ذلك طاقة قدرها ٥٠٠٠٠ إلكترون ڤولت ، وفى هذه اللحظة يجد البروتون نفسه متحركاً داخل القطب الأيمن الأجوف حيث لا يوجد مجال كهربى . إلا أنه يوجد مجال مغنطيسى فى الاتجاه الرأسى يؤثر على الشحنة المتحركة بقوة عمودية على اتجاه حركتها (راجع الفقرة ١٤ — ٨) ، فإذا كان اتجاه المجال المغنطيسى إلى أعلى اتخذ المسار شكل نصف دائرة ويكون فى اتجاه حركة عقرب الساعة عندما ننظر إليه من أعلى ، وعندما تنعكس إشارة القطبين ، أى عندما يصبح القطب الأيسر سالباً بالنسبة للأيمن ، فى اللحظة التى يعود فيها البروتون إلى الفتحة بين القطبين ، بالضبط ، فإنه يتعجل عبر الفتحة مرة ثانية مكتسباً مزيداً من الطاقة قدره ٥٠٠٠٠ إلكترون ڤولت ، ويظل متحركاً فى مسار دائرى تحت تأثير المجال المغنطيسى ، إلا أن الدائرة فى هذه الحالة سوف تكون أكبر نظراً لزيادة سرعته . وواضح أنه إذا أمكننا تنظيم العملية بحيث يتبادل القطبان جهديهما عند اللحظة المضبوطة تماماً ، فإن البروتون يكتسب ٥٠٠٠٠ إلكترون ڤولت فى كل مرة يعبر فيها الفتحة ويتحرك فى مسار حلزونى يتسع اتساعاً منتظماً إلى حافة القطبين . وعند هذه الحافة يوجد لوح يطلق عليه « اللوح الحارف » مرفوع إلى جهد سالب عال ويستخدم فى جذب الجسيم خارج تجويف القطب ويحرفه إلى غرفة خارجية حيث يصطدم بالهدف . ويلزم أن تكون المنطقة التى يتحرك فيها الجسيم مفرغة من الهواء تفريغاً جيداً ، كما هى العادة فى معجلات الجسيمات .



(شكل ٢٨ – ٣)

وواضح أن كل أيون إيدروجين يبدأ عند اللحظة التى يكون فيها القطب الأيمن سالباً ، سوف يتعرض إلى سلسلة المؤثرات التى سبق ذكرها . وعلى ذلك نتوقع أن نجد بروتونات فى جميع مراحل رحلاتها إلى خارج الأقطاب ، من بروتونات تعبر الفتحة عند المركز إلى أخرى تعبرها عند الحافة حيث تكون قد تهيأت للانحراف إلى الخارج ، وظاهر أننا الآن نواجه مشكلة كبيرة ، إذ كيف يتأتى أن يكون توقيت تبادل الجهد بين القطبين مضبوطاً بالنسبة لكل من الجسيمين ، الذى بدأ من توه عند المركز ، والذى انتهى من دوراته الحلزونية ، معاً ؟ والتغلب على هذه المشكلة هو السر فى نجاح السيكلوترون . فالقوة المؤثرة على شحنة ش تتحرك بسرعة ع فى مجال مغنطيسى هـ هى و = ش ع هـ ، وحيث إن الجسيم يتحرك فى دائرة ، فيجب أن تكون هذه القوة — كما نعلم — قوة مركزية جاذبة وتساوى $\frac{ك ع^{2}}{نق}$ ، ونحصل من هذا التطابق على ما يأتى :

$$ش ع هـ = \frac{ك ع^{2}}{نق} \quad أو \quad \frac{نق}{ع} = \frac{ك}{هـ ش} \qquad ٢٨ - ١$$

والزمن الذى يأخذه الجسيم ليعمل نصف دورة (من الفتحة وإليها ثانية) يساوى المسافة التى يتحركها (π نق) مقسومة على سرعته (ع) : $ن_{\frac{1}{2}} = \frac{\pi \, نق}{ع}$.

وبالتعويض عن $\frac{نق}{ع}$ فى المعادلة السابقة نحصل على :

$$ن_{\frac{1}{2}} = \frac{\pi \, ك}{ش هـ} \qquad ٢٨ - ٢$$

وهذه هى النتيجة التى كنا نبحث عنها ، إذ أن الزمن الذى ينقضى بين عبورين متتابعين للفتحة لا يتوقف على نصف قطر المسار ، ولا على سرعة البروتون . وعلى ذلك فيبقى ثابتاً ، ويظل هو نفسه سواء للجسيم المبتدئ أو الجسيم الخارج . (أى أنه عندما تزداد السرعة يزداد نصف القطر بنفس النسبة ، أى تظل النسبة بينهما ثابتة لجميع الجسيمات المتساوية فى المقدار $\frac{ش}{ك}$)

ومن الممكن الآن التنبؤ بطاقة الحركة التي يتخذها الجسيم، فباستخدام المعادلة ٢٨ — ١، نحصل على :

$$ط_ع = \frac{١}{٢} ك ع^٢ = \frac{١}{٢} ك \left(\frac{هـ ش نق}{ك} \right)^٢ = \frac{١}{٢} \frac{هـ^٢ ش^٢ نق^٢}{ك} \qquad ٢٨\text{—}٣$$

وواضح أنه يلزمنا للحصول على جسيمات (ذات $\frac{ش}{ك}$ معينة) عاليةالطاقة، مجال مغنطيسى شديد (هـ) يكفى لتغطية القطبين D ذوى المساحة الكبيرة . وهذا يفسر كبر حجم السيكلوترون المنتج للطاقة العالية . وتتراوح أقطار السيكلوترونات الموجودة حاليًّا بين ١٥ بوصة و ٦٠ بوصة وهذا يتطلب إنشاءات مغنطيسية تتراوح أوزانها بين ١٠ ، ٢٠٠ طن .

ويجدر بنا أن نفترض بعض البيانات ونحسب طاقة الحزمة التى يمكن الوصول إليها بوساطة السيكلوترون . فلنفرض أن لدينا مغنطيساً يمكن أن يعطى مجالا قدره ١٣٠٠٠ أورستد على دائرة قطرها ٤٠ بوصة (راجع الفقرة ١٤ — ٧)، وأن الجسيمات المطلوب تعجيلها هى الديوترونات ($_١$يد^٢) ، فنجد :

$$ط_ع = \frac{١}{٢} \frac{ش^٢}{ك} هـ^٢ نق^٢$$

وهذه الثوابت تساوى بالنسبة للديوترون :

$$ش = ١٦ \times ١٠^{-٢٠} \text{ كولوم } = ٤,٨ \times ١٠^{-١٠} \text{ وحدة إلكتروستاتيكية}$$

$$ك = ٢,٠١ \times ١,٦٦ \times ^{-٢٤} \text{ جراما } = ٣,٣٤ \times ١٠^{-٢٤} \text{ جراماً}$$

$$هـ = ١٣٠٠٠ \text{ أورستد } = \frac{١٣٠٠٠}{٣ \times ١٠^{١٠}} \text{ وحدة إلكتروستاتيكية}$$

$$نق = ٢٠ \text{ بوصة } = ٢٠ \times ٢,٥٤ \text{ سم } = ٥٠,٨ \text{ سم}$$

$$\therefore ط_ع = \frac{١}{٢} \frac{(٤,٨ \times ١٠^{-١٠})^٢ \times (١٣٠٠٠)^٢ \times (٥٠,٨)^٢}{٣,٣ \times ١٠^{-٢٤} \times (٣ \times ١٠^{١٠})^٢}$$

$$= ١,٦٨ \times ١٠^{-٥} \text{ إرج}$$

$$= \frac{١,٦٨ \times ١٠^{-٥}}{١٦ \times ١٠^{-٧}} = ١٠,٥ \text{ م . ا . ف}$$

ويا له من جسيم عالى الطاقة ! ويمكن الحصول على التردد الذى يجب أن يتبادل به القطبان جهديهما من المعادلة ٢٨ — ٢ . فإذا كان زمن نصف الدورة $\text{ن}_{\frac{1}{2}} = \frac{\pi\ \text{ك}}{\text{هـ ش}}$ يكون زمن الدورة الكاملة $٢\ \text{ن}_{\frac{1}{2}} = \frac{٢\ \pi\ \text{ك}}{\text{هـ ش}}$ ، ويجب أن يكون الجهد قد تبدل مرة وعاد إلى حالته الأصلية فى هذا الزمن ، وعلى ذلك يكون تردد التبادل هو :

$$\text{ت} = \frac{١}{٢\ \text{ن}_{\frac{1}{2}}} = \frac{\text{هـ ش}}{٢\ \pi\ \text{ك}} \qquad ٢٨ — ٤$$

وبالتعويض بالقيم العددية نجد أن :

$$\text{ت} = \frac{١٣٠٠٠ \times ٤,٨ \times ١٠^{-١٠}}{٣ \times ١٠^{١٠} \times ٤\ \pi \times ٣,٣٤ \times ١٠^{-٢٤}} = ١٠^{٧}\ \text{دورة فى الثانية}$$

وعلى ذلك يجب أن يتبدل الجهد عشرة ملايين مرة فى الثانية ، لكى يحفظ الخطى مع الديوترون الدائر . أضف إلى ذلك أننا نلاحظ أن معادلة الطاقة ٢٨ — ٣ ، لا تتوقف على فرق الجهد بين القطبين ، وإذا انخفض فرق الجهد ، فكل ما يحدث أن تعمل الديوترونات عدداً أكبر من الدورات لكى تكتسب نفس الطاقة . فلنفرض أننا سلطنا ٥٠٠٠٠ ڤولت بين القطبين ، فحيث إن الطاقة النهائية = ١٠,٥ م . ا . ف (= ١٠,٥ × ١٠^٦ ا . ف) فيلزم أن يعبر الديوترون الفتحة $١٠,٥ \times \frac{١٠^{٦}}{٥٠٠٠٠} = ٢١٠$ مرات . أى أنه يجب أن يدور ١٠٥ دورات فى رحلته الحلزونية إلى الخارج ، ويجب أن يتغير الجهد أثناء ذلك ١٠٥ مرات وهذا يتطلب زمناً قدره $\frac{١٠٥}{١٠^{٧}} = ١٠,٥ \times ١٠^{-٦}$ ثوان . أى حوالى عشر ميكروثانية لكى يتم الديوترون رحلته . ويمكن حساب السرعة النهائية للجسيم كما يلى :

$$\tfrac{1}{2}\ \text{ك}\ \text{ع}^{٢} = \text{ط}_{\text{ع}} = ١,٦٨ \times ١٠^{-٥}\ \text{إرج}$$

$$\text{ع}^{٢} = \frac{٢ \times ١,٦٨ \times ١٠^{-٥}}{٣,٣٤ \times ١٠^{-٢٤}} = ١٠,٠ \times ١٠^{١٨}$$

$$= ٣,١٦ \times ١٠^{٩}\ \text{سم/ثانية}$$

أى حوالى عشر سرعة الضوء .

ونلاحظ ، فى النهاية ، من المعادلة ٢٨ – ٤ ، أن الدائرة المتذبذبة التى تمد القطبين بالجهد المتردد ، يجب أن يتناسب ترددها مع $\frac{ش}{ك}$ للجسم المعجل . ومن ثم ، فالديوترونات وجسيمات ألفا تتطلب التردد نفسه تقريباً ، حيث إن شحنة الجسيم الأخير تساوى ضعف شحنة الديوترون ، كما أن كتلته تساوى ضعف كتلة الديوترون تقريباً ، ويلزم ضعف ذلك التردد للبروتونات ، إذ أن كتلة البروتون تساوى نصف كتلة الديوترون فقط ، ولكن ليس من السهل ضبط تردد المتذبذب لهذا المدى ، ولهذا السبب تصمم السيكلوترونات إما للبروتونات وإما للديوترونات وجسيمات ألفا . فى حالة سيكلوترونات الديوترونات وجسيمات ألفا تكون طاقة جسيمات ألفا ضعف طاقة الجسيمات ، كما يتضح من معادلة الطاقة .

٢٨ – ٤ حدود السيكلوترون

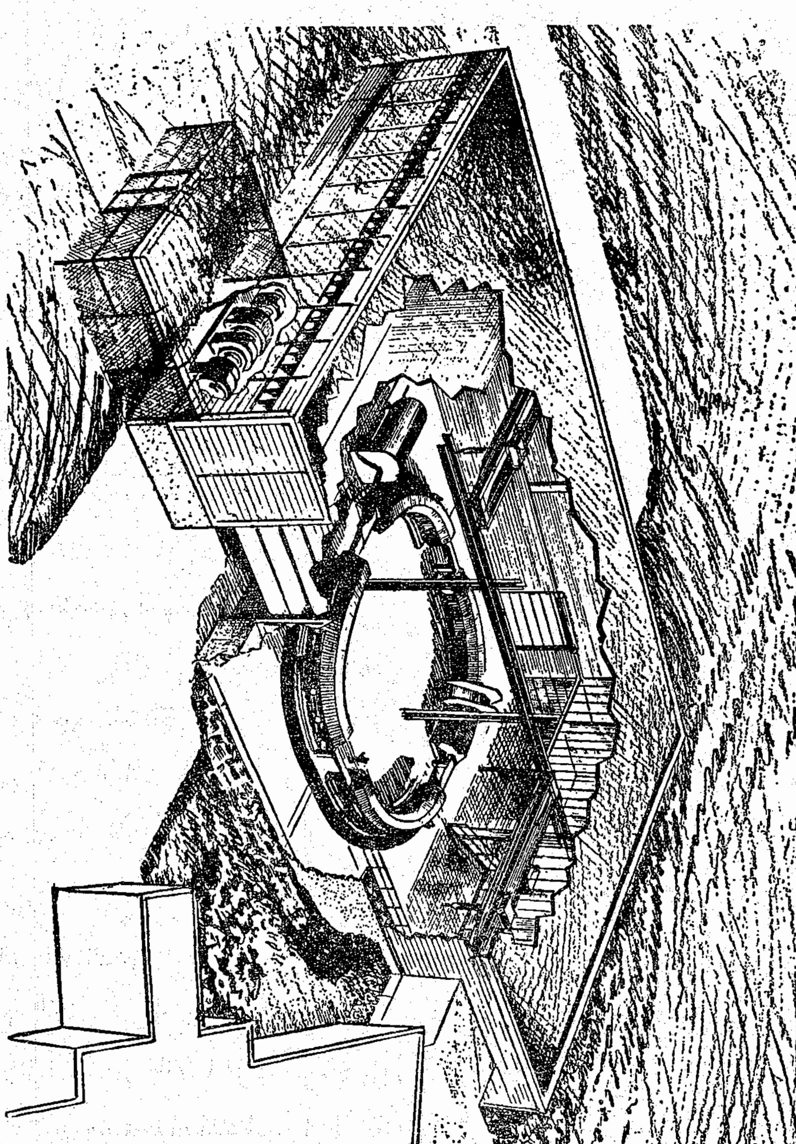
يتبين من دراسة المعادلة ٢٨ – ٤ أن تردد الجهد المتبدل للقطبين يتوقف على كتلة الجسيم المعجل ، وعلى ذلك يكون التردد الثابت فعالا فقط ، ما دامت كتلة الجسيم ثابتة أثناء اكتسابه للسرعة . ولهذا السبب ، لا يستخدم السيكلوترون لتعجيل الإلكترونات إلى الطاقات العالية . وحتى الجسيمات الأثقل مثل البروتونات ، أو الديوترونات ، أو جسيمات ألفا تبدأ فى معاناة تزايد ملموس فى الكتلة طبقاً للنظرية النسبية ، عندما تكون الطاقة فى حدود ١٠٠ م . ا . ف ، ويضع هذا التزايد فى الكتلة حدًّا أعلى للطاقة التى يمكن الحصول عليها من السيكلوترون . إذ أن الجسيم يحتاج عندما يبلغ حافة القطب إلى تردد ، يختلف عنه عندما يكون عند المركز . ولقد نجحت السيكلوترونات الموجودة حاليًّا فى إعطاء حزم من البروتونات والديوترونات بطاقة تصل إلى ١٦ م . ا . ف ، وشدة تيار تصل إلى ١٦ أمبيرا ، كما أمكن الحصول على جسيمات ألفا بطاقة تبلغ ضعف تلك الطاقة ، وشدة تيار تبلغ حوالى عشر قيمتها فى حالة البروتونات والديوترونات . أما إذا أردنا الحصول على طاقات أعلى ، فيجب أن يعدل السيكلوترون تعديلا أساسيًّا (٢٨–٥) .

٢٨ ــ ٥ السينكروترون

حيث إنه لا توجد وسيلة لمنع زيادة الكتلة طبقاً للنظرية النسبية ، فتتجه المحاولات إلى التعويض عنها . وتوحى المعادلة (٢٨ ــ ٤) بأنه إذا سمحنا للمجال المغنطيسى أن يتزايد بهذا المعدل الذى تتزايد به الكتلة ، فإنه يمكن إحداث التعجيل باستخدام تردد ثابت ، وهناك سبيل آخر لذلك ، وهو أنه يمكننا السماح للتردد بالتناقص تناقصاً يتناسب مع تزايد الكتلة ، ويمكننا السماح لكل من التردد والمجال المغنطيسى بالتغير . وتسمى الأجهزة التى تعتمد على تغير التردد أو المجال المغنطيسى « بالسينكروترونات » (وفيها تتزامن ظروف التشغيل مع تزايد الكتلة) .

والسينكرو سيكلوترون الذى بنى لأول مرة فى جامعة كاليفورنيا ، يمثل أحد أنواع تلك الأجهزة . وتعمل هذه الآلة فى داخل منطقة الطاقة النسبية للديوترونات وجسيمات ألفا باستخدام مجال مغنطيسى ثابت وجهد متبدل متغير التردد . ومغنطيسه من نوع مغنطيس السيكلوترون المعتاد ويزن ٤٠٠٠ طن ويبلغ قطر كل من قطبيه ١٨٤ بوصة . ولقد تم الحصول منه على ديوترونات وصلت طاقتها إلى ٢٠٠ م . ا . ف ، وجسيمات ألفا وصلت طاقتها إلى ٤٠٠ م . ا . ف ، وحتى هذه الأرقام لا تمثل الحدود النهائية للآلة . فقد استكشفت أنواع متعددة من التفاعلات النووية فألقت ضوءاً جديداً على طبيعة القوى النووية .

وبازدياد طاقة الجسيمات الثقيلة المراد الحصول عليها تصبح المغنطيسات السيكلوترونية النوع (ذات الأقطاب الأسطوانية المحاطة بالأذرع) باهظة الثمن أكثر من اللازم ، وذات حيز كبير جداً . فبالتأكيد يزداد الوزن تناسبياً مع مكعب قطر القطب أو مع طاقة الحزمة مرفوعة إلى الأس $\frac{3}{2}$. ولهذا السبب ولاعتبارات أخرى نلجأ إلى استخدام المغنطيس الحلقى الذى يحوى قطاع تعجيل أو أكثر متداخلة فى الحلقة . وكل من المجال المغنطيسى والتردد يتغير مع الزمن . ويجرى العمل الآن فى بناء عدة سينكروترونات من هذا النوع تعطى طاقة فى المدى من ٢ إلى ١٠ بلايين إلكترون ڤولت. ونجد فى شكل ٢٨ ــ ٤ رسما كروكياً لأحد هذه الأجهزة .

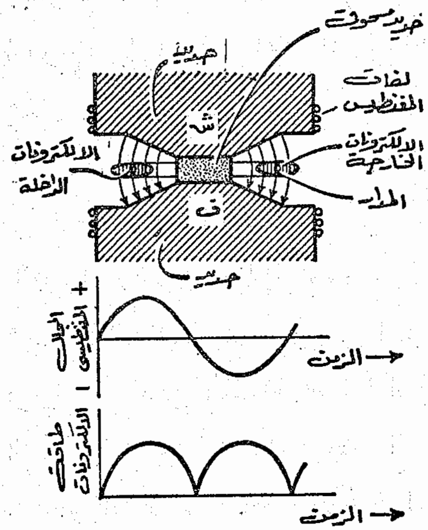


(شكل ٢٨ – ٤)

بعد استئذان المعمل الأهلى فى بروكهافن

٢٨ — ٦ البيتاترون

استخدم « د . كيرست D. Kerst » فى عام ١٩٤٠ ، تطبيقاً باهراً لظاهرة الحث الكهرومغنطيسى للحصول على الإلكترونات العالية الطاقة . وتسمى هذه الآلة « البيتاترون » ونجدها موضحة فى شكل ٢٨ — ٥ . فتوضع أنبوبة زجاجية على شكل حلقة (كعكة) مفرغة من الهواء بين قطبي مغنطيس كهربى كبير ، وتدخل الإلكترونات الصادرة من فتيل متوهج هذه الحلقة . ويتغير المجال المغنطيسى بصورة تبدلية . ولقد أكدنا فى الباب الخامس عشر ، أن المجال المغنطيسى المتغير يحدث مجالا كهربيًّا ، وهذه هى ظاهرة الحث الكهرومغنطيسى . ولنفرض الآن أننا نلاحظ ما يحدث عند اللحظة التى يكون فيها القطب العلوى شماليًّا والقطب السفلى جنوبيًّا ،



(شكل ٢٨ — ٥)

ويكون المجال متزايداً . وتمثل هذه الحالة بالنسبة للإلكترونات الموجودة فى الفراغ كما لو كان هناك قطب شمالى يقترب من أعلى . فتتحرك الإلكترونات بحيث يكون اتجاه مجالها المغنطيسى مضادًّا للتقارب الظاهرى (قاعدة لنز) ، والسبب فى اتخاذه هذا الاتجاه هو السبب نفسه فيما يحدث فى حالة الملف الذى يقترب منه قضيب مغنطيسى (شكل ١٥ — ٦) . وإذا تذكرنا أن حركة الإلكترون هى عبارة عن تيار فى الاتجاه المضاد ، فإننا نستخلص أن الإلكترونات تتحرك فى اتجاه حركة عقرب الساعة عندما ننظر إليها من الناحية العلوية للأنبوبة الزجاجية . وإذا كان المجال المغنطيسى كبيراً ويتزايد بمعدل كبير ، فإن الإلكترونات تعمل مئات الألوف من الدورات فى الحلقة الزجاجية فى الفترة الزمنية القصيرة التى يتزايد فيها

المجال ، وحيث إن التوصيل الكهربى يحدث فى الفراغ ، فإن الإلكترونات تكتسب طاقة بانتظام أثناء دورانها . وعندما يتوقف المجال عن التزايد يكون الإلكترون قد اكتسب طاقة تبلغ عدة ملايين من الإلكترون ڤولت ، ويتحرك الإلكترون عند هذه الطاقات بسرعة تقرب من سرعة الضوء، وتصبح كتلته أضعاف كتلته الساكنة . وعندما يبدأ المجال المغنطيسى فى الانخفاض ينعكس المجال الكهربى المنتج بالتأثير . وتبطؤ الإلكترونات . إلا أن الحزمة الإلكترونية تسحب من الحلقة الزجاجية إلى الخارج، قبل انعكاس المجال المنتج بالتأثير ، أو تصوب نحو هدف لتصطدم به بخفض المجال المغنطيسى سريعًا بوساطة مجموعة إضافية من الملفات المغنطيسية . وعلى ذلك فالبيتاترون يستخدم ، فقط ، الربع الأول من دورة المجال فى توليد حزمة من الإلكترونات العالية الطاقة . وقد أمكن الحصول ، فى الوقت الحاضر ، على إلكترونات تصل طاقتها إلى ١٠٠ م . ا . ف من بيتاترون كبير فى معامل أبحاث شركة جنرال إليكتريك . ويمكن استخدام هذه الإلكترونات مباشرة كقذائف نووية ، أو يمكن استخدام الأشعة السينية الشديدة النفاذية التى تنتج من تصادم الإلكترونات بهدف معين . ولا يزال علينا أن نستغل جميع إمكانيات هذه الإلكترونات العالية الطاقة ، والأشعة السينية التى تصحبها .

ويمكننا أن نسوق هنا نتيجة تم الحصول عليها من تشغيل البيتاترون ، تؤيد نظرية « ماكسويل » للإشعاع الكهرومغنطيسى . فلقد أوضحنا فى الفقرة ١٩ — ٢ أن الإلكترون المعجل يجب أن يشع ، طبقًا لهذه النظرية، بإشعاع كهرومغنطيسى . إلا أن نظرية « بوهر » أنكرت حدوث ذلك إذا كان الإلكترون مقترنًا بنواة ذرية ، واستعاضت عنه بالمدارات التى لها خواص الكم . على أنه من المسلم به أن الإلكترون الطليق لا يخضع لشروط الكم هذه . وعلى ذلك فيجب أن يشع عندما يعجل . والإلكترونات فى البيتاترون طليقة ومعجلة(عجلتها مركزية جاذبة).ولقد لوحظ أن إلكترونات البيتاترون العالية الطاقة هذه تشع موجات كهرومغنطيسية يقع بعضها فى منطقة الضوء المنظور . فهذه الإلكترونات المعجلة مضيئة إضاءة ذاتية ، وهى بذلك تعطى برهانًا مرئيًا على صحة نظرية « مكسويل » . وفى الواقع ، تكون هذه

الطاقة المشعة كموجات كهرمغنطيسية على حساب طاقة الحركة للإلكترونات . ويضع هذا الضياع من طاقة الحركة حدًّا أعلى عمليًّا لطاقات البيتاترون . ويحتمل أن يكون هذا الحد أقل بكثير من بليون إلكترون ڤولت ، ولذلك يوصى باستخدام سينكروترون الإلكترونات للحصول على طاقات أعلى ، وفيها تستخدم القوة الدافعة الكهربية المنتجة بالتأثير من المجال المغنطيسى المتغير والمجالات الكهربية التى يعطيها متذبذب خارجى ، لرفع قيمة طاقات الإلكترونات . ويجرى الآن بناء عدة سينكروترونات إلكترونية لتعطى طاقة فى حدود مئات الملايين من الإلكترون ڤولت .

٢٨ ــ ٧ تطبيقات الطاقة العالية

ربما نتساءل عن الدوافع للسعى وراء المزيد من الطاقة ، ولابد أن تكون الإجابة عن هذا التساؤل السديد مبنية ــ ولو جزئيًّا على الأقل ــ على أسس تأملية إلى حد ما ، فتكمن المشكلة الرئيسية فى الفيزياء النووية فى طبيعة القوى النووية ودورها الذى تلعبه فى التركيب النووى . ولقد حد من تجارب التحول النووى فى الماضى ، الطاقات التى كانت ميسرة للتفاعلات التى ينبعث فيها جسيم واحد فقط . ومن المعقول أن نفترض أن إدخال طاقات أكبر فى النواة ربما يتسبب فى انبعاث مجموعة من الجسيمات . ولقد جاءت الشواهد الأولى على حدوث هذه التفاعلات المعقدة عن طريق دراسات الأشعة الكونية . وتجرى الآن دراسة التفاعلات المتعددة الجسيمات بالتفصيل باستخدام جسيمات ألفا ذات طاقة ٤٠٠ م . ا . ف من سينكروسيكلوترون كاليفورنيا .

وتبذل المحاولات فى تصميم المعجلات فى الوقت الحاضر ، لزيادة مدى طاقات الجسيمات لتصل إلى منطقة الطاقة فى الأشعة الكونية . ولقد كان معروفاً منذ سنوات أن الأرض التى نعيش عليها تتعرض بانتظام لقذائف إشعاعية ذات طاقة عالية للغاية تأتى من الفضاء الكونى بين النجوم . ودرست هذه الأشعة الكونية دراسة دقيقة باستخدام الغرفة السحابية ، وعدادات جيجر ، وغرفة التأين ، والألواح

الفوتوغرافية التى وضعت على ارتفاعات عالية كثيرة . وتدل أحسن الشواهد على أنها تتكون على الأغلب ، إن لم يكن فقط ، من البروتونات ذات الطاقات التى تبلغ عدة بلايين من الإلكترون ڤولت . وتصطدم هذه الجسيمات الكونية بالجو بانتظام ، وينتج عن هذه التصادمات تفاعلات نووية ، وأغلب الإشعاع الذى يصل إلى سطح الأرض ، فى الواقع ، ينتج عن هذه التفاعلات . ولقد درست طبيعة هذا هذا الإشعاع الكونى الثانوى دراسة مستفيضة ، ووجد أنها تتكون من إلكترونات موجبة وسالبة وأشعة جاما ، وبروتونات ونيوترونات بالإضافة إلى جسيم جديد له شحنة الإلكترون ، ولكن كتلته تتوسط بين كتلة البروتون وكتلة النيوترون . وأطلق على هذا الجسيم اسم « الميزون » (ويعنى الجسيم المتوسط) ولقد شوهدت ميزونات موجبة وسالبة تتراوح كتلها فيما بين ٢٠٠ و ١٠٠٠ ضعف لكتلة الإلكترون الساكنة (وليس هناك دليل على استبعاد وجود الميزون المتعادل) ، ويبلغ عمر أكثر الميزونات شيوعاً (كتلته حوالى ٢٠٠ كتلته الإلكترون) حوالى ٢ ميكروثانية ، وبعد انقضاء هذا العمر تتحول كتلته الزائدة إلى زوج نيوترينو وإلكترون عادى موجب أو سالب . وأحد مظاهر اكتشاف الميزون الذى يلفت النظر ، هو أن العالم اليابانى « يوكاوا » تنبأ بوجوده عام ١٩٣٥ ، ليفسر طبيعة نوع القوى التى يبدو أنها موجودة داخل النواة . وافترض أن الميزون ليس طليقا داخل النواة ، فهو كالإلكترون يتولد من بروتون أو نيوترون .

ويظهر أن الميزونات فى الأشعة الكونية تتولد فى الطبقات العليا للجو بوساطة جسيمات الأشعة الكونية الابتدائية (من المحتمل أن تكون بروتونات) ، ولم تنتج الميزونات فى المعمل إلا حديثاً ، ويرجع ذلك إلى الطاقات الكبيرة الداخلة فى إنتاج الميزون ، فالطاقة اللازمة لتوليد ميزون كتلته ٢٠٠ كتلة الإلكترون مثلا ، تبلغ حوالى $\frac{٢٠٠}{١٨٣٧}$ × ٩٣١ = ١٠٢ م . ا . ف ، ولقد تم إنتاج الميزونات باستخدام حزمة من جسيمات ألفا ذات الطاقة ٤٠٠ م . ا . ف من سينكروسيكلوترون كاليفورنيا .

هناك كلمة أخيرة ، هى فى الوقت الحاضر مجرد تأملات : فنحن نعلم أنه لتوليد

زوج من الإلكترونات يلزمنا ١ م . ا . ف ، ولتوليد زوج من الميزونات يلزمنا عدة مئات من الإلكترون ڤولت (ويتوقف ذلك على كتلته) ، فما هى الطاقة اللازمة لتوليد زوج من البروتونات ؟ حيث إن كتلة البروتون تساوى الوحدة تقريباً ، فهى تساوى ٩٣١ م . ا . ف من الطاقة ، وعلى ذلك يتطلب توليد زوج منها بليونين من الإلكترون ڤولت . وطبقاً لقانون بقاء الطاقة يلزم أن يكون أحدهما سالباً ، والاسم الذى أطلق على هذا الجسيم مبدئياً هو « الأنتيبروتون » أو « ضد يد البروتون » . هذا ، ولم يشاهد هذا الجسيم على الإطلاق ضمن الأشعة الكونية الثانوية ، ولم يكن لدينا الطاقة الكافية فى المعمل لمحاولة توليده ، والمقترح أن سينكروترونا ذا طاقة ٣,٥ بليون إلكترون ڤولت قد يفى بالغرض . ولابد أن يكون الأنتيبروتون جسما غريباً ومثيراً حتى ولو كان عمره قصيراً جداً « وهذا هو الحال بدون شك » ، أو ليس من الممكن أن يكون الأنتيبروتون قذيفة فعالة للغاية ، حيث إنه ينجذب إلى شحنات نواة الهدف ولا يتنافر معها ؟ وكيف تتفاعل النواة إذا انضم هذا الجسيم لمجموعة النكليونات؟ ربما تحظى هذه الأسئلة بالإجابة عنها عندما يتم الوصول إلى بناء سينكروترونات أكبر* .

مسائل

١ — إذا استخدم جهاز «فان دى جراف» يولد فرق جهد قدره ٣,٥ م . ا . ف فى تعجيل ا — بروتونات (ب) ديوترونات (ج) — جسيمات ألفا ، فما هى طاقات هذه الجسيمات بالمليون إلكترون ڤولت .

٢ — احسب أكبر قيمة لطاقة البروتونات التى يمكن الحصول عليها من سيكلوترون قطر قطبه D ٤٥ بوصة وشدة مجاله المغنطيسى ١٢٠٠٠ أورستد .
(الجواب : ٢٢,٥ م . ا . ف)

* أمكن بالفعل توليد الأنتيبروتون فى معمل الطبيعة النووية بجامعة كاليفورنيا عام ١٩٥٦ باستخدام سنكرسيكوترون طاقته ٦ ب . ا . ف (المترجم) .

٣ ــ ما هو تردد جهد قطبي السيكلوترون اللازم فى المثال رقم ٢ ؟

(الجواب : ١٨,٤ ميجاسيكل / ثانية)

٤ ــ ما هى عدد الدورات التى تعملها البروتونات فى المثال رقم ٢ إذا كان فرق الجهد بين القطبين ٦٠٠٠٠ ڤولت ؟ وما هو الزمن الكلى اللازم ؟

(الجواب : ١٨٧ ، ١٠,٢ ميكروثانية)

٥ ــ ما هى السرعة النهائية للبروتونات فى المثال رقم ٢ ؟

(الجواب : ٦,٦ × ١٠^٩ سم ، ثانية أو ٤١٠٠٠ ميل / ثانية)

٦ ــ أعد حل الأمثلة ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ باستبدال الديوترونات بالبروتونات

الأجوبة : ١١,٢ م . ا . ف ، ٩,٢ ميجا سيكل / ثانية ، ٩٤ ، ١٠,٢ ميكروثانية ، ٣,٣ × ١٠^٩ سم / ثانية .

٧ ــ أعد حل الأمثلة ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ باستبدال جسيمات ألفا بالبروتونات.

الأجوبة : ٢٢,٥ م . ا . ف ، ٩,٢ ميجا سيكل / ثانية ، ٩٤ ، ١٠,٢ ، ٣,٣ × ١٠^٩ سم / ثانية

٨ ــ ما هى النسبة المئوية للزيادة فى كتلة ديوترون طاقته ٢٠٠ م . ا . ف عندما يقارن بديوترون ساكن ؟

(الجواب : ١٠,٧ /)

٩ ــ احسب طولى الموصلين الأوليين فى معجل سلون ولورنس الخطى إذا استخدم لتعجيل ديوترونات بتردد قدره ١٠ ميجا سيكل/ ثانية وفرق جهد قدره ٥٠٠٠ ڤولت عبر الفتحات . (افرض أن الأيونات تبدأ من السكون عندما تدخل فى الفتحة التى تسبق الموصل الأول ، وتذكر أن سرعات الأيونات داخل الأسطوانات الجوفاء ثابتة) (الجواب ٢٢ سم ، ٣١ سم) .

مراجع مقترحة للاطلاع

"FOUNDATIONS OF NUCLEAR PHYSICS" New York, Dover Publications Inc., 1949.

تظهر فى صفحة ٢٣ صورة طبق الأصل . لبحث كوكروفت ووالتن عن التحول الأول الناتج عن جسيمات معجلة ، وفى صفحة ٩٣ صورة طبق الأصل ، لبحث لورنس وليفنجستن عن اختراع السيكلوترون .

KERST, D. W. "Development of the Betatron," January, 1947 issue of The American Scientist (Vol. 35, No. 1)

تعطى صفحة ٥٧ فصلا مبسطاً لتاريخ التعجيل الحثى الذى أدى بكاتب المقال إلى بناء البيتاترون .

POLLARD, E. & DAVIDSON, W. L. "Applied Nuclear Physics" New Vork, John Wiley & Sons, 1942.

الباب الرابع يحتوى على وصف لمختلف معجلات الجسيمات بلغة سهلة .

الفصل التاسع والعشرون

الأنشطار النووى والطاقة النووية

٢٩ ـــ ١ النيوترونات الحرارية

إن أبرز خاصتين للنيوترون هما افتقاره إلى الشحنة الكهربية وكتلته البالغة وحدة كتلة واحدة (تقريبا) ، وله ، كما لاحظنا فى مناقشتنا لاكتشافه ، قدرة نفاذية عظيمة . فجسيم ألفا ، والديوترون ، والبروتون تحدث تأييناً كثيفاً أثناء حركتها فى الأوساط المادية ، إذ تسمح الشحنة الكهربية الموجبة ، التى تحملها هذه الجسيمات ، لها بانتزاع الإلكترونات الذرية تحت تأثير الجذب الكهربى . وبالمثل ، يتفاعل الإلكترون المتحرك بسرعة عالية مع الإلكترونات الذرية ويحدث تأييناً ولكن بدرجة أقل. أما الفوتون (أشعة جاما) ، فهو لا يحمل أية شحنة تمكنه من التفاعل مع الإلكترونات ، ويفقد طاقته عن طريق تصادم «كومتن» وانبعاث الإلكترونات الفوتونية ، وإذا كانت طاقته تزيد على ١,٠٢ م . ا . ف ، فقد يتلاشى تماما منتجاً زوجاً من الإلكترونات .

وعلى النقيض من هذه الوسائل المختلفة للتأيين ، فالنيوترون لا يتفاعل كهربيا مع الإلكترونات ، لخلوه من الشحنة ، ويفقد طاقته عن طريق التصادم المباشر بالنوى فقط . ويعطى النيوترون جزءاً ملموساً من كمية تحركه وطاقته للنواة أثناء هذه التصادمات ، إذ أن كتلته قريبة من الكتل النووية . ولقد أدت تصادماته مع نوى الأيدروجين إلى اكتشافه ، وإذا كان التصادم مرنا ومباشرا انتقلت كمية تحرك النيوترون بأجمعها إلى البروتون . ولقد بينا (راجع الفقرة ٧ ـــ ٥) أن الزاوية الأكبر احتمالا للتصادم المرن بين جسيمين متساويين فى الكتلة هى ٤٥° ، ويعطى النيوترون عند هذه الزاوية نصف طاقته للبروتون. فإذا ما عانى النيوترون عشرة تصادمات ، من هذه التصادمات الأكبر احتمالا ، انخفضت طاقته بالنسبة $(\frac{1}{2})^{10}$ أو $\frac{1}{1024}$ وتصبح هذه النسبة حوالى $\frac{1}{1000000}$ إذا ما ازداد عدد التصادمات إلى ٢٠

تصادما . وعلى ذلك فيلزم للنيوترون الذى طاقته ١ م . ا . ف أن يعمل حوالى عشرين تصادماً من التصادمات الأكبر احتمالا بنواة الأيدروجين لتنخفض طاقته إلكترون ڤولت واحدا (يستخدم فى الحسابات العملية متوسط فقد الطاقة ، بطبيعة الحال ، بدلا من فقد الطاقة الأكبر احتمالا ، ويزيد المتوسط فى الواقع عن النصف) .

ويجدر بنا ، من وجهة النظر التعليمية ، أن نحسب كمية الطاقة التى تصحب النيوترون ، فى المتوسط ، فى حركته الحرارية لو كان هذا النيوترون جزءاً من غاز فى درجة حرارة الغرفة (٣٠٠° مطلقة) ، ويأتى هذا الحساب نتيجة مباشرة لنظرية الحركة (راجع الفقرة ٩ — ٦) .

$$\text{متوسط طاقة الحركة الحرارية للذرة} = \frac{٣}{٢}\,\frac{م}{ن}\,ر$$

حيث م هى ثابت الغاز ويساوى ٨,٣ × ١٠^٧ إرجا / درجة حرارة مطلقة ، ن عدد أفوجادرو ويساوى ٦,٠٢ × ١٠^٢٣ ، وعلى ذلك تكون :

$$\text{طاقة الحركة} = \frac{٣}{٢} \times \frac{٨,٣ \times ١٠^{٧}}{٦,٠٢ \times ١٠^{٢٣}} \times ٣٠٠ = ٦,٢ \times ١٠^{-١١} \ \text{إرج}$$

$$= \frac{٦,٢ \times ١٠^{-١٤}}{١٦ \times ١٠^{-١٣}} \ \text{إلكترون فولت}$$

$$= ٠,٠٤ \ \text{إلكترون ڤولت}$$

وعلى ذلك ، فإذا عانى النيوترون الذى طاقته الأصلية ١ م . ا . ف ٢٥ تصادماً من التصادمات الأكبر احتمالا بنوى الأيدروجين ، فإن طاقته تنخفض إلى الطاقة الحرارية ، وتسمى هذه النيوترونات « بالنيوترونات الحرارية »، فالنيوترونات التى تبدأ بطاقة قدرها عدة ملايين من الإلكترون ڤولت ، مثلا ، تنخفض طاقتها إلى الطاقات الحرارية بمرورها فى طبقة من شمع البرافين يتراوح سمكها بين ١٠ و ١٥ سم ، وما أن تصل طاقتها إلى هذا القدر حتى تسلك سلوك الغاز ، ولو أنها تكون غازا غير مستقر نسبيًّا ، إذ أن النيوترون يضمحل فى النهاية بإشعاع إلكترون ليصبح

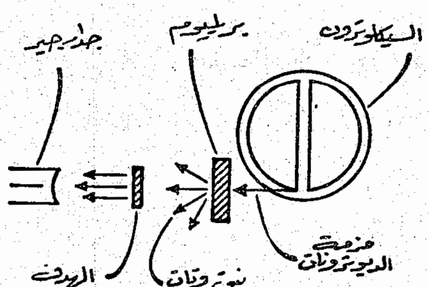
بروتوناً (يحتمل أن يكون عمر النصف لهذا الاضمحلال أقل من ٣٠ دقيقة) ، أو يختفى فى تفاعل نووى مع النواة . وينبغى لنا أن نلاحظ أن هذه الكيفية لتدهور طاقة الجسيم إلى القيم الحرارية ، فريدة وينفرد بها النيوترون . والنيوترون هو الجسيم الوحيد الذى يحافظ على ذاتيته عند الطاقات الحرارية ، فجسيم ألفا أو الديوترون أو البروتون يلتقط كل منها ما يحتاج إليه من الإلكترونات المدارية ويصبح ذرة متعادلة عند طاقات أعلى بكثير من الطاقة الحرارية ، وكذلك بالمثل ينضم الإلكترون إلى الذرة ويصبح إلكتروناً مدارياً لها .

٢٩ ــ ٢ النيوترون كأداة قذف

سوف نفرق ابتداء من هذه المرحلة فى مناقشتنا بين نوعين من النيوترونات ، السريعة وهى التى تقع طاقتها فى حدود مليون إلكترون ڤولت ، والبطيئة أو الحرارية وهى التى تقع فى حدود ١ إلكترون ڤولت . أو أقل . ويستخدم كلا النوعين كوسائل قذيفية فى الحث على التحول النووى (ولو أن « القذف » تعبير مبالغ فيه إلى حد ما للنيوترونات الحرارية المتحركة حركة عشوائية) ، ولا تقيم النواة الموجبة الشحنة حاجزاً تنافرياً يمنع اقتراب النيوترون ، وذلك لخلوه من الشحنة . ولهذا السبب يمكن للنيوترون أن يدخل النواة ويستحثها على التحول ، والآن لندرس نوعى التفاعلات .

تفاعلات النيوترونات السريعة :

تعتمد الصورة التى قدمناها لإبطاء النيوترونات على التصادمات المرنة بينها وبين النوى . وهذه التصادمات هى بكل تأكيد النوع الذى له الاحتمال الأكبر ، على أن النيوترون السريع له فرصة صغيرة لعمل تصادم غير مرن . أى أنه ينفذ فعلا فى النواة ، ويحدث نواة مركبة غير مستقرة كالتى نصادفها فى جميع التحولات المستحثة . وينتج ذلك النوع العادى من التفاعلات النووية الذى ينبعث فيه بروتون



(شكل ٢٩ – ١)

أو جسيم ألفا أو حتى نيوترون آخر وذلك بالإضافة إلى الاحتمال العادى لانبعاث أشعة جاما . ومن أكثر الطرق شيوعاً للحصول على النيوترونات ، تلك الطريقة التى يستخدم فيها مصدر طبيعى مشع لجسيمات ألفا ، والتى تعتمد على التفاعل الذى أدى إلى اكتشاف النيوترون ، وهو ${}_{4}$بى^{9} (ألفا ، ن) ${}_{6}$ك^{12} . « فيمكننا إذن أن ندرس ما يحدث لهدف يتعرض للقذف بهذه النيوترونات المنبعثة . وهناك أيضاً طريقتان شائعتان للحصول على النيوترونات لهما علاقة بحزمة الديوترونات الصادرة من السيكلوترون ، وهما تتضمنان التفاعلين ${}_{4}$بى^{9} (د ، ن) ${}_{5}$ب^{10} ، بى^{7} (د ، ن) ${}_{4}$بى^{8} وكلتا الطريقتين تعطيان نتاجا وافرا من النيوترونات . ونجد فى شكل ٢٩–١ رسماً توضيحياً للعملية . وفيما عدا تكنية الحصول على النيوترونات السريعة ، الأمر الذى له الأهمية الأولى ، فالجديد مما بقى من موضوع التفاعلات الحادثة من النيوترونات السريعة قليل ، ونسوق فيما يلى بضعة تفاعلات مثالية لهذا النوع .

$$ {}_{5}\text{ب}^{10} + {}_{0}\text{ن}^{1} \rightarrow {}_{3}\text{لى}^{7} + {}_{2}\text{هى}^{4} $$

$$ {}_{7}\text{ن}^{14} + {}_{0}\text{ن}^{1} \rightarrow \text{ك}^{14} + {}_{1}\text{يد}^{1} $$

$$ \rightarrow {}_{7}\text{ن}^{14} + {}_{-1}\text{ش}^{0} $$

$$ {}_{9}\text{فل}^{19} + {}_{0}\text{ن}^{1} \rightarrow {}_{7}\text{ن}^{16} + {}_{2}\text{هى}^{4} $$

$$ \rightarrow {}_{8}\text{ا}^{16} + {}_{-1}\text{ش}^{0} $$

$$ {}_{13}\text{لو}^{27} + {}_{0}\text{ن}^{1} \rightarrow {}_{12}\text{مج}^{27} + {}_{1}\text{يد}^{1} $$

$$ \rightarrow {}_{13}\text{لو}^{27} + {}_{-1}\text{ش}^{0} $$

تفاعلات النيوترونات الحرارية

إن أكثر التصادمات شيوعاً بين النيوترونات البطيئة والنوى ، من النوع المرن ، مثلها فى ذلك مثل النيوترونات السريعة . إلا أنه ينشأ اعتبار آخر جديد فى حالة النيوترونات البطيئة . فنظراً لحركتها العشوائية ، تبقى فى داخل مادة الهدف مدة طويلة نسبياً . وبذلك تزداد فرصة حدوث تفاعل نووى يتسبب عنها . والنيوترونات

البطيئة لها فعالية كبيرة كأداة للتحول النووى . لأنها تعاود التصادم المرة تلو المرة بنوى الهدف ، فى حين أن النيوترونات السريعة تنفذ من الهدف وتذهب إلى سبيلها . ولما كان ما يتسبب عنه التحول هو جزء صغير فقط من التصادمات ، فإن المزيد من عدد التصادمات التى يعانيها النيوترون البطىء يزيد من عدد التحولات التى يمكن حدوثها . وهناك اعتبار آخر تنفرد به النيوترونات البطيئة فهى ، على عكس جميع الأنواع الأخرى من الجسيمات القذيفية ، لا تعطى النواة إلا القليل جداً من طاقة الحركة بحيث يمكن التغاضى عنها (أقل من إلكترون ڤولت) ، وتكون نتيجة ذلك فى العادة ، أسر النيوترون ، وتكوين نظير جديد يشع أشعة جاما (يعتبر الانشطار من الشواذ الواضحة لهذه القاعدة كما توجد شواذ أخرى كذلك) ، ولتوضيح ذلك ، نفرض أننا قذفنا هدفاً من الصوديوم بالنيوترونات الحرارية ، ونريد أن نعرف التفاعلات التى يمكن حدوثها . ويمكننا معرفة ذلك بالاستعانة بجدول كتل النظائر (الجدول د) كما يلى :

${}_{١١}$ص^{٢٣} $\longleftarrow$ ${}_{٠}$ن^{١} (حرارى) $\longleftarrow$ ؟

وطاقة الكتلة المتوافرة لدينا هى :

طاقة الكتلة = كتلة ${}_{١١}$ص^{٢٣} + كتلة ${}_{٠}$ن^{١}

= ٢٢,٩٩٦٤ + ١,٠٠٨٩ = ٢٤,٠٠٥٣ وحدة كتلة

ولنفرض أن التفاعل كان على الصورة (ن ، ب) :

${}_{١١}$ص^{٢٣}+${}_{٠}$ن^{١} $\overset{؟}{\longleftarrow}$ ${}_{١٠}$نو^{٢٣} + ${}_{١}$يد^{١}=٢٣,٠٠٠٨+١,٠٠٨١=٢٤,٠٠٨٩وحدة كتلة

وهذا التفاعل مستحيل الحدوث من ناحية موازنة الطاقة .

وعلينا الآن أن نحاول التفاعل (ن ، ألفا) :

${}_{١١}$ص^{٢٣}+${}_{٠}$ن^{١} $\overset{؟}{\longleftarrow}$ ${}_{٩}$فل^{٢٠}+هى=٢٠,٠٩٦٥+٤,٠٠٣٩=٢٤,٠١٠٤وحدة كتلة

وهذا أيضاً مستحيل .

ولنفرض ، إذن ، عدم انبعاث أى جسيم أى أن التفاعل يكون (ن ، ν) :

${}_{١١}$ص^{٢٣} + ${}_{٠}$ن^{١} $\longleftarrow$ ${}_{١١}$ص^{٢٤} + $h\nu$ = ٢٣,٩٩٧٧ + $h\nu$

$\therefore$ $h\nu$ = ٢٤,٠٠٥٣ – ٢٣,٩٩٧٧ = ,٠٠٧٦ وحدة كتلة = ٧,١ م .إ ف

فالصوديوم ٢٤ يشع فوتون أشعة جاما بطاقة قدرها ٧,١ م . ا . ف ، وهو أيضاً ، غير مستقر ويضمحل إلى $_{١٢}$مج^{٢٤} بانبعاث إلكترون (عمر نصفه ١٤,٨ ساعة). ويعتبر قذف الصوديوم بالنيوترونات البطيئة طريقة ممتازة لصناعة الصوديوم المشع (ص^{٢٤}) ، وينبغى ألا يتبادر إلى أذهاننا أن جميع نفاعلات النيوترونات الحرارية من النوع (ن ، γ) ، ولو أن لها الاحتمال الأكبر فى الحدوث ، وبعملية حسابية كالتى سبق إجراؤها ، يمكننا تعيين التفاعل المحتمل من وجهة نظر توازن الطاقة . ولقد كان « أنريكو فيرمى » أول من أبرز أهمية النيوترونات الحرارية فى التفاعلات النووية عام ١٩٣٤ ، فوجد هو وزملاؤه أن أسر النيوترونات البطيئة فى العناصر المتعددة (مثل الكادميوم مثلا) ظاهرة احتمال حدوثها كبيرة جداً .

٢٩ ــ ٣ الانشطار النووى ــ هان وشتراسمان

لقد فتح طريق جديد لمعالجة التفاعلات النووية ، بعد أن اتضحت إمكانيات تصادمات كل من النيوترونات السريعة والبطيئة . وبدت بارقة أمل لحل بعض المسائل ، وكانت إحدى هذه المسائل بوجه خاص ، تكوين العناصر التى تلى اليورانيوم فى جدول العناصر (عناصر ما بعد اليورانيوم أو الترانسيورانية) ، فلم يكن لقذف نواة اليورانيوم المشحونة كهربياً ذات الطاقات التى يمكن الحصول عليها أى تأثير ، نظراً للحاجز الكهربى الكبير الذى تقيمه الشحنات الكهربية الموجبة البالغ عددها ٩٢ شحنة ، الموجودة فى نواة اليورانيوم . على أنه لا يوجد ما يمنع النيوترون من أن يدخل هذه النواة بالسهولة التى يدخل بها أى نواة أخرى . ولقد وجد « فيرمى » وزملاؤه عام ١٩٣٤ ، أن قذف اليورانيوم بالنيوترونات البطيئة أنتج أعماراً نصفية كثيرة فى مادة الهدف ، وعزوا ذلك إلى العناصر الترانسيورانية الحديثة التكوين .

ولقد أثارت هذه النتائج اهتماماً كبيراً ، وقام عدد كبير من العلماء فى السنوات الخمس التالية ، بإجراء التجارب على قذف اليورانيوم بالنيوترونات السريعة والبطيئة . ووجدت أعمار نصفية إشعاعية كثيرة ، ولكن المحاولات التى أجريت للتعرف

إليها ومطابقتها بنوى معينة تعرضت لكثير من اللبس والغموض . وأخيرا جاء « هان وشتراسمان » وكانا يعملان فى ألمانيا ، عام ١٩٣٩ ، وبينا بصفة قاطعة أن أحد العناصر التى كان يظن أنها ترانسيورانية كانت فى الواقع نظيرا للباريوم (ذ = ٥٦) ، ولقد تعرفا عليه من عمر نصفه بالإضافة إلى الطرق الكيموية . كما تم التعرف ، بالمثل ، إلى نظائر أخرى تقع فى الجزء الأوسط من جدول العناصر . ولقد اقترح هان وشتراسمان تفسيراً لهذه النتائج الشاذة ، بنى عليه فى الحال فريش ومايتنر (اللذان كانا زميلين سابقين لهان وشتراسمان ولكنهما أصبحا لاجئين وعملا فى معمل بوهر فى كوبنهاجن) ، فنواة اليورانيوم تنشطر إلى شطرين ، عندما تأسر نيوتروناً بطيئاً ، ولابد أن يكون الباريوم أحد هذين الشطرين وأطلق على الظاهرة اسم « الانشطار النووى » وواصل العلماء دراسة هذا النوع المدهش الجديد من التفاعلات النووية فى المعامل الكثيرة فى جميع أنحاء العالم ، وما أن انقضى عام واحد حتى كانت بضع مئات من البحوث عن الانشطار قد نشرت .

٢٩ — ٤ شظايا انشطار اليورانيوم

لليورانيوم الموجود فى الطبيعة ثلاثة نظائر لها الكتل والوفرة النسبية الآتية :

$_{٩٢}$بو^{٢٣٨} (٩٩,٢٨ ٪) ، $_{٩٢}$بو^{٢٣٥} (٠,٧١ ٪) ، $_{٩٢}$بو^{٢٣٤} (٠,٠٠٥ ٪)

وبفصل بضعة ميكروجرامات من اليورانيوم ٢٣٥ بوساطة مطياف الكتلة ، ثبت دون أدنى شك ، أن هذا النظير هو الذى ينفلق بالنيوترونات البطيئة . (ينفلق اليورانيوم ٢٣٥ بالنيوترونات السريعة فى أحوال نادرة فقط ، ويمكن التغاضى عن هذا الانفلاق بالنيوترونات السريعة بالنسبة لما تحدثه النيوترونات البطيئة) ، وتكون النواة الحادثة $_{٩٢}$يو^{٢٣٦} غير مستقرة أساساً وتنشطر ، إلى نواتين متقاربتين فى الكتلة (شكل ٢٩ — ٢) .

ولقد شوهد مظهران هامان لشظايا الانشطار :

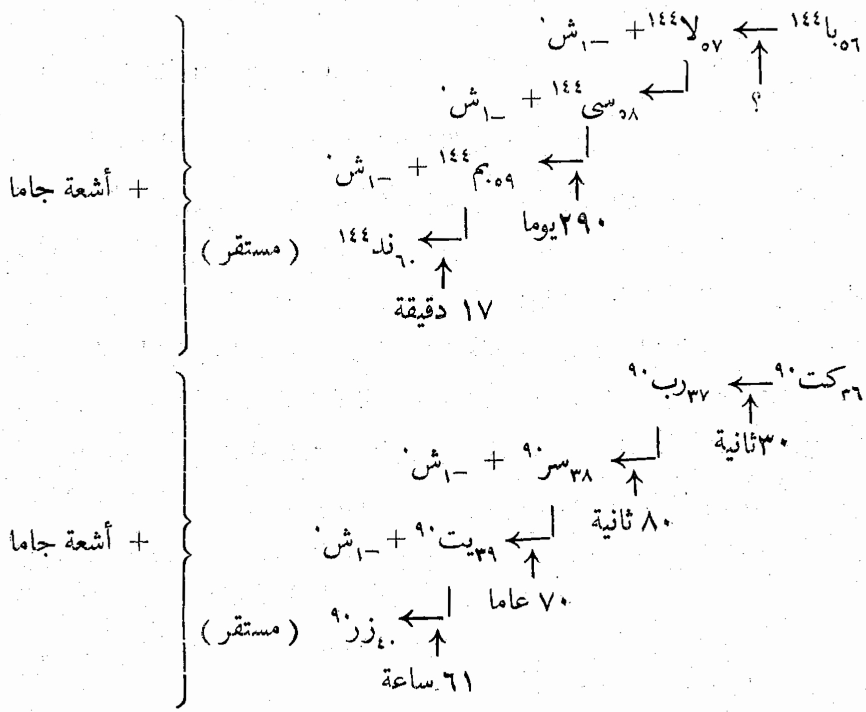
(الأول) يمثل إحدى الشظيتين ، فى المتوسط ، ٦٠ ٪ من الكتلة الأصلية ويمثل الآخر حوالى ٤٠ ٪ ، وحدوث الانشطار إلى جسيمين متساويين فى الكتلة

أقل جداً فى الاحتمال . أضف إلى ذلك أن الشظايا تكون مشعة بدرجة عالية وتصل فى النهاية إلى الاستقرار بعد سلسلة إشعاعية معقدة تهبط بها من حالتها الأصلية .

(الثانى) ينطلق نيوترونان سريعان أو ثلاثة فى المتوسط ، بالإضافة إلى الشظيتين النوويتين (شكل ٢٩ — ٢) . ولتوضيح ذلك ، نكتب معادلة تفاعل من التفاعلات الكثيرة الممكنة :

$${}_{92}\text{يو}^{235} + {}_{0}\text{ن}^{1}\ (\text{حرارى}) \longrightarrow {}_{56}\text{با}^{144} + {}_{36}\text{كت}^{90} + 2\,{}_{0}\text{ن}^{1}\ (\text{سريع})$$

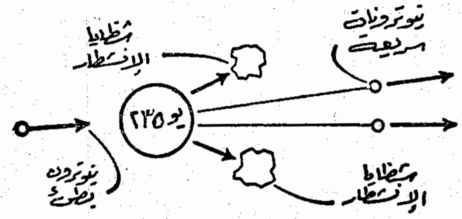
ونوى الباريوم والكريبتون غير مستقرة وتضمحل إلى الاستقرار بالسلسلتين الإشعاعيتين الآتيتين :



وواضح أن حل السلاسل الإشعاعية الناتجة عن الانشطار عمل شاق بالمقارنة بتحليل السلاسل الإشعاعية الطبيعية . وعلى الرغم من أن الانشطار يحدث لحظياً ، إلا أن النشاط الإشعاعى للشظايا الذى يتبعه يدوم لبضعة أيام أو أسابيع .

وعلى الرغم من أن نوع شظايا الانشطار يتغير ، فإن شكل السلسلة

الإشعاعية يكون واحداً لجميع الأنواع عامة . أى أن السلسلة عبارة عن تتابع انبعاث جسيمات بيتا ، ويتضح ذلك مما يأتى . تحتوى العناصر الثقيلة جداً على عدد من النيوترونات بالنسبة للنكليونات أكبر مما تحتويه العناصر المستقرة المتوسطة الكتلة . وعلى ذلك ، فسوف يكون فى الشظايا فائض من النيوترونات ينبعث بعض منها أثناء عملية الانشطار ، ويتحول المتبقى إلى بروتونات بانبعاث الإلكترونات ، وهكذا تنشأ سلسلة تتراوح حلقاتها ما بين ثلاث وخمس حلقات وتستمر حتى يتم الوصول إلى عنصر مستقر .



(شكل ٢٩ – ٢)

٢٩ – ٥ الطاقة المنطلقة عند الانشطار

يمثل انشطار اليورانيوم تحولا لطاقة الكتلة على مقياس لم يسمع به من قبل . ففيه يتحول حوالى ١ ٪ من كتلة اليورانيوم ٢٣٦ إلى طاقة حركة ! وهذا يعنى انطلاق طاقة تبلغ حوالى ٢٠٠ م . ا . ف . ، وتتلخص إحدى الطرق التى اتبعت لتعيين هذا الرقم فى وضع اليورانيوم ومصدر النيوترونات البطيئة فى إناء محكم معزول عن مصادر الحرارة الخارجية ، وبقياس الارتفاع فى درجة حرارة الإناء وما يحتويه ، يمكن حساب الطاقة الكلية المنطلقة ، وباستخدام عداد جيجر أو غرفة تأين لتسجيل عدد عمليات الانشطار المتسببة فى انطلاق هذه الطاقة ، أمكن الحصول على الطاقة المنطلقة فى الانشطار الواحد . وبعملية حسابية بسيطة تبين لنا هذه المقادير التى نعنيها ، فإذا حدث لكل النوى الموجودة فى رطل من اليورانيوم ٢٣٥ انشطاراً ، فإنه يمكن حساب االطاقة الكلية المنطقة كما يأتى :

الطاقة المنطلقة فى الانشطار الواحد (للذرة) = ٢٠٠ م . ا . ف

$= ٢٠٠ \times ١٦ \times ١٠^{-٧}$ إرجا

$= ٣,٢ \times ١٠^{-٤}$ إرجا

. و الرطل الواحد = ٤٥٤ جم $= \frac{٤٥٤}{٢٣٥}$ جرام جزيئى (مول)

وعدد الذرات فى الرطل $= \frac{٤٥٤}{٢٣٥} \times ٦,٠٢ \times ١٠^{٢٣} = ١,١٦ \times ١٠^{٢٤}$ ذرة

∴ الطاقة الكلية المنطلقة $= ١,١٦ \times ١٠^{٢٤} \times ٣,٢ \times ١٠^{-٤}$

$= ٣,٧ \times ١٠^{٢٠}$ إرجا

وهذه الطاقة تكافئ الحرارة الناشئة عن احتراق مليونى رطل من الفحم .

وتبين القياسات التقريبية لطاقة النيوترونات المتحررة ، وأشعة جاما ، والإلكترونات المنبعثة فى النشاط الإشعاعى الذى يتبع الانشطار ، تبين هذه القياسات التوزيع فى طاقة الانشطار ، فحوالى ٨٠ ٪ من المائتى مليون إلكترون ڤولت ، يكون من نصيب طاقة الحركة للشظايا النوية . ولقد بينا فى بند ٢٩ ـــ ١ أن الطاقات الحرارية فى درجة حرارة الغرفة تكون حوالى ٠,٠٤ إلكترون ڤولت ، وعلى ذلك ، فالشظية الانشطارية تكتسب طاقة تقابل بضعة بلايين درجة مطلقة . ونحن ، ولا شك ، نقف مطأطئى الرؤوس أمام هذا القدر الهائل من طاقة الحركة الحبيسة فى صورة كتلة ، إذ أن الرقم السالف ذكره نتج عن تحول جزء من الألف فقط (١, ٪) من كتلة اليورانيوم . أما الجزء الباقى من الطاقة الكلية البالغ حوالى ٢٠ ٪ منها ، فهو من نصيب النيوترونات المتحررة فى الانشطار ، وشظاياه ، وتكون فى هذه الأخيرة على صورة طاقة إشعاعية .

ولو أن التنبؤ بعملية الانشطار من قاعدة أينشتين لتكافؤ الكتلة والطاقة لم يكن ممكناً ، إلا أن هذه القاعدة تبين لنا السبب فى انطلاق الطاقة ، فإذا تأملنا جدول كتل النظائر نجد أن طاقة الربط للنكليون تكون أكبر فى النوى المتوسطة الكتلة منها فى النوى الأثقل . ويصل الفرق إلى ١ م . ا . ف لكل نكليون . وعلى ذلك ، فإذا انشطر اليورانيوم بو٢٣٦ إلى شظيتين متساويتى الكتلة تقريباً ، نتجت زيادة فى طاقة الربط قدرها حوالى ٢٠٠ م . ا . ف (أو ٢٣٦ م . ا . ف طبقاً لهذه المناقشة التقريبية) وتنطلق المائتا مليون إلكترون ڤولت هذه ، على صورة أخرى من صور الطاقة ، ويكون بعض منها على الأقل طاقة حركة لشظايا الانشطار .

٢٩ ـــ ٦ نيوترونات الانشطار

يفتح لنا النيوترونان السريعان أو الثلاثة ، التى تتحرر عندما ينشطر اليورانيوم ٢٣٦ ، بابا جديدا ، هو التفاعل المتسلسل . فحيث إن الانشطار يتطلب نيوتروناً ، وإن النيوترونات تتحرر بالانشطار ، فيمكن جعل العملية تستمر تلقائياً . ولكن

إذا كان هذا صحيحاً ، فلماذا تبقى لدينا اليورانيوم ٢٣٥ حتى الآن ، إذ أنه يوجد دائماً نيوترونات هائمة من الأشعة الكونية يمكنها إحداث الانفجار ؟ ويكمن الجواب عن ذلك فى حقيقتين :

(١) أن اليورانيوم ٢٣٥ يحيط به اليورانيوم ٢٣٨ بكمية تفوقه بمقدار ١٤٠ ضعفاً ، وهذا يقيه من النيوترونات.

(٢) أن النيوترون البطىء أكفأ بكثير من النيوترون السريع فى إحداث الانشطار ، والنيوترونات المتحررة من الانشطار نيوترونات سريعة .

وعلى ذلك تقابلنا مشكلتان إذا أردنا تنشيط التفاعل المتسلسل . وهما تزويد ذرات اليورانيوم ٢٣٥ ، أى إزالة اليورانيوم ٢٣٨ ، وإبطاء النيوترونات المتحررة فى الانشطار لزيادة فعاليتها . وفى الحالة التى تستخدم فيها كتلة كبيرة من اليورانيوم تتم عملية الإبطاء حتما عن طريق التصادم بنوى اليورانيوم الثقيلة ، وهذه وسيلة عديمة الجدوى فى خفض الطاقة . ومن ثم يتضح لنا أنه حتى لو استخدمنا عينة من اليورانيوم ٢٣٥ المزودة إلى درجة كبيرة ، فإننا لا نحصل على التفاعل المتسلسل إلا إذا كان حجم العينة كبيراً إلى درجة تكفى للإبقاء على النيوترون داخلها أثناء إبطائه بالتصادمات (شكل ٢٩ — ٣) ، وعلى ذلك ، فلا بد من وجود حجم حرج إذا قل حجم العينة عنه قلت النيوترونات بعدد كبير بحيث لا يمكنها الإبقاء على التفاعل . وهذا هو السبب فى أنه لا تنشأ خطورة فى تداول اليورانيوم ٢٣٥ ، إذا ما تزود ، ولعل ذلك يوحى بتكنية ممكنة لعمل قنبلة الانشطار النووى . فالانفجار يحدث عندما تجمع بصفة سريعة كتلتان حجم كل منهما أقل من الحجم الحرج ، فإذا كان الحجم الناتج أكبر من الحجم الحرج حدث التفاعل المتسلسل وانطلقت



(شكل ٢٩ — ٣)

طاقة هائلة للغاية . والزمن الذى ينتشر فيه هذا التفاعل المتسلسل فى كتلة اليورانيوم كلها ، لا يتجاوز بضعة أجزاء من المائة من الميكروثانية .

٢٩ ــ ٧ النوى الأخرى القابلة للإنشطار

أدت صعوبة عملية فصل اليورانيوم ٢٣٥ ، من النظير ٢٣٨ (سبق معالجة الموضوع العام لفصل النظائر فى الفصل الثامن عشر) إلى البحث عن نوى أخرى قابلة للانشطار ، ولقد ثبت أن كلا من الثوريوم (ذ = ٩٠) والبروتوا كتينيوم (ذ = ٩٠) يعطى الظاهرة نفسها بصورة طفيفة جدًّا . على أن « بوهر وهويلر » تنبآ ، من اعتبارات نظرية ، أن العنصر الترانسيورانى ذا العدد الذرى ذ = ٩٤ يجب أن ينشطر بالنيوترونات البطيئة بالسهولة نفسها ، التى ينشطر بها اليورانيوم ٢٣٥ . وتتكون العناصر التراتسيورانية بقذف اليورانيوم ٢٣٨ بالنيوترونات السريعة ، والتفاعلات المتضمنة فى العملية هى :

$${}_{٩٢}\text{بو}^{٢٣٨} + {}_{٠}\text{ن}^{١}\ (\text{سريع}) \longrightarrow {}_{٩٢}\text{بو}^{٢٣٩}$$

$$\xrightarrow{\text{٢٣ دقيقة}} {}_{٩٣}\text{م}^{٢٣٩} + {}_{-١}\text{ش}^{٠}$$

$$\xrightarrow{\text{٢,٣ يوما}} {}_{٩٤}\text{م}^{٢٣٩} + {}_{-١}\text{ش}^{٠}$$

والعنصر ٩٣ هو النبتونيوم ، أما العنصر ٩٤ فهو البلوتونيوم ، وهو الذى ينشطر بسهولة .

وحيث إن هذه العناصر لا توجد فى الطبيعة ، فيلزم صناعتها بالتحول النووى ، هذا ، ولو أن صناعة البلوتونيوم من اليورانيوم ٢٣٨ صعبة ، إلا أنه يمكن فصله من أصله اليورانيومى بالطرق الكيموية ، فى حين أن اليورانيوم ٢٣٥ يتطلب إجراءات أصعب لفصله من اليورانيوم ٢٣٨ . ولكى نلمس صعوبة عملية صناعة البلوتونيوم يجب علينا أن نتذكر أن حدوث أية عملية تحول بعيد الاحتمال نسبيًّا ، حيث إن فرصة دخول النيوترون فى النواة ضعيفة جدًّا ، بالمقارنة بفرصة التصادم المرن أو الاختفاء التام . وأكبر كمية أمكن إنتاجها من أى عنصر بالتحول فى المعمل كانت بضعة أجزاء من المليون من الجرام . وإذا أردنا استخدام البلوتونيوم

لتحرير الطاقة النووية (طاقة الكتلة) على مقياس عملى فيلزمنا الحصول على آلاف الجرامات منه ، ومن ثم يتضح لنا أن الإنتاج الناجح للبلوتونيوم تطلب إجراءات تجريبية ضخمة . ولقد جاء الحل لهذه المشكلة على يدى « فيرمى » باختراعه « للمفاعل النووى » أو « الركام النووى » .

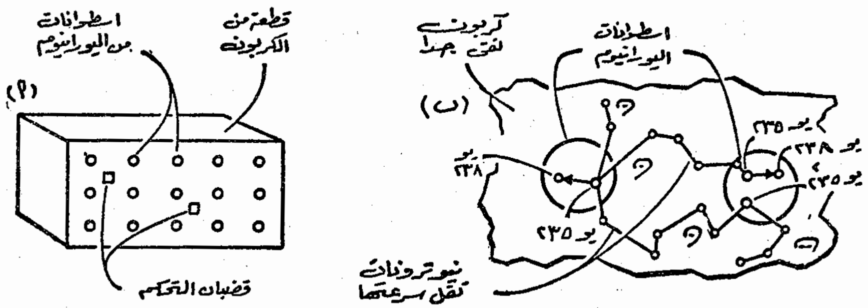
٢٩ ــ ٨ المفاعل النووى ــ « فيرمى » ١٩٤٢

يلزمنا لإنتاج البلوتونيوم ، كما سبق أن رأينا ، يورانيوم ٢٣٨ ونيوترونات سريعة ، ويعتبر انشطار اليورانيوم ٢٣٥ مصدراً طيباً للنيوترونات السريعة ، ولكن لكى نحافظ على استمرار هذا المصدر ، تلزمنا نيوترونات بطيئة للانشطار . ويحقق لنا المفاعل النووى هذه الاحتياجات .

لنأخذ أسطوانتين من اليورانيوم العادى (٩٩,٣ ٪ من بو^{٢٣٨} ، ٠,٧ ٪ من يو^{٢٣٥}) ، ونفصلهما عن بعضهما بعنصر له تأثير كبير فى إبطاء النيوترونات مع قابلية صغيرة لامتصاصها . ويطلق على هذه المادة اسم « المهدئ » .

ولقد سبق أن رأينا أن الأيدروجين يبطئ النيوترونات بسهولة ، ولكنه ، لسوء الحظ ، يمتصها بسهولة أيضا فى التفاعل النووى $_{١}$يد^{١} (ن ، γ) $_{١}$يد^{٢} ، وعلى ذلك فهو لا يصلح كمهدئ . والعنصران اللذان ثبت أنهما أنسب العناصر فى التهدئة . . هما الديوتيريوم ($_{١}$ يد^{٢}) والكربون الذى يشيع استخدامه فى هذه المهمة ، على أنه يجب أن يكون نقيا للغاية حتى نتجنب امتصاص النيوترونات فى الشوائب .

ويمكن وصف مجريات الحوادث فى المفاعل كما يلى : يدخل نيوترون فى الكربون (من الخارج مثلا) ويبطؤ فيه ، ويدخل فى النهاية إحدى أسطوانات اليورانيوم ، حيث يتصادم عدة مرات بنوى اليورانيوم حتى يدخل فى النهاية نواة يورانيوم ٢٣٥ ، ويحدث انشطاراً للنواة يو^{٢٣٦} ، ولنفرض أن ثلاثة نيوترونات سريعة نتجت عن هذا ، وأن أحدها امتصته نواة يو^{٢٣٨} فتحولت فى النهاية إلى بولوتونيوم ، ويفلت الآخران إلى الكربون ، حيث يبطآن فى النهاية بفعل التصادمات الكثيرة التى يعملانها مع نوى الكربون ، ومن ثم يهيمان ويدخلان أسطوانة يورانيوم جديدة (أو ربما دخلا الأسطوانة التى خرجا منها) ، فإذا أصابا فى النهاية نواة



(شكل ٢٩ – ٤)

٢٣٥ ، تكررت العملية (شكل ٢٩ – ٤) ، وعلى ذلك فنجاح المفاعل فى صناعة البلوتونيوم يكمن فى استخدام بعض نيوترونات الانشطار السريعة فى قذف اليورانيوم **٢٣٨** ، وإبطاء الباقى من هذه النيوترونات لإحداث الانشطار فى اليورانيوم **٢٣٥** وتوليد نيوترونات أكثر . ولإنتاج البلوتونيوم على نطاق واسع يجب أن تضاعف هذه المجموعة عدة مرات . والتحكم فيها بسيط جداً ، فإذا كان الانشطار حادثاً بمعدل أعلى من اللازم يمكن إدخال بضع أسطوانات من مادة تمتص النيوترونات البطيئة (كالكادميوم مثلا) فى المهدئ ، وتعمل هذه الأسطوانات على خفض عدد النيوترونات فى المهدئ ، وذلك بامتصاصها ، وبإزالة أسطوانات الكادميوم يرتفع معدل التفاعلات .

٢٩ – ٩ المفاعل النووى كمصدر للحرارة

ينطلق من انشطار نواة اليورانيوم **٢٣٥** طاقة تبلغ حوالى ٢٠٠ م . ا . ف ، يكون أغلبها على صورة طاقة حركة ، وعلى ذلك فأسطوانات اليورانيوم قد تسخن إلى درجة أعلى من درجات انصهارها بسرعة كبيرة إذا لم تبرد ، وتمتص هذه الطاقة الحرارية الناتجة فى صناعة البلوتونيوم ، فى كميات ا مياه التبريد الهائلة الجارية . (تستخدم لجنة الطاقة الذرية للولايات المتحدة الأمريكية جزءاً من نهر كولومبيا لهذا الغرض) ، على أن هذه الحرارة يمكن أن تستخدم فى أغراض نافعة ، ومن ثم

يصبح المفاعل صالحاً للاستخدام ، كفرن يعمل بالطاقة النووية ، وتجرى الآن دراسة هذه الناحية من استخدام الطاقة النووية . والمشكلة الرئيسية هى عمل مفاعلات ذات درجة حرارة عالية ، وليس ضرورياً أن يكون إنتاج الطاقة الحرارية فيها بالضخامة التى تنتج بها فعلا . والمفروض أن المفاعل سوف يستخدم « كمرجل » لآلة بخارية من النوع المألوف ، لإنتاج الطاقة الكهربية فى النهاية . ودرجة الحرارة العالية ضرورية لكى ترتفع كفاءة العملية كما هو الحال فى أية آلة حرارية . ولم يظهر حتى الآن ، أى نوع جديد من الآلات ينتج الطاقة الكهربية أو الميكانيكية من الوقود النووى مباشرة. وتتضاعف هنا المشكلات الميكانيكية والتعدينية المتشعبة للآلة الحرارية العادية ، بوجود الكميات الهائلة من النيوترونات والإشعاعات .

٢٩ ــ ١٠ الاندماج النووى

سبق لنا أن ناقشنا فى البند ٢٧ ــ ٣ النقص فى الكتلة ، الذى ينشأ عن جمع بروتونين ونيوترونين معا فى نواة الهيليوم ، وبينا أن هذا النقص يبلغ ٠,٠٣٠٣ وحدة كتلة أى ٢٨ م . ا . ف . ، وهذا يوحى بإمكان تحرير طاقة الكتلة عن طريق اندماج الجسيمات الأولية لتكوين نواة أكثر تعقيداً . ويطلق على عملية انطلاق الطاقة أثناء تكوين النوى اسم « الاندماج النووى » وهى عكس الانشطار النووى . وفى حين أن الانشطار يكون ممكنا فى حالات النوى الثقيلة جداً ، فقط ، نجد أن الاندماج عملية طاقة مربحة فى النوى الخفيفة جداً فقط . وتكمن الصعوبة فى العثور على طريقة معملية يمكن بها « طبخ » الهيليوم من مزيج من البروتونات والنيوترونات ، ولم يتم الوصول إلى طريقة من هذا النوع حتى الآن* على سطح الأرض ، على أنه ليس من الحكمة أن نعلن استحالتها . فالطريقة موجودة فى الواقع ، ولكن فى باطن الشمس .

---

* تم بالفعل إنتاج القنبلة الأيدروجينية التى تعمل بالاندماج ، كما أن التجارب الأولى للمفاعل الأيدروجينى صادفت تقدماً كبيراً (المترجم) .

٢٩ ــ ١١ دورة الشمس الكربونية النيتروجينية

كان « بيته Bethe » ، هو الذى تقدم عام ١٩٣٩ بالنظرية ، المقبولة الآن ، القائلة بأن الطاقة الحرارية للشمس تنتج من الاندماج النووى ، فكانت فكرته أن الأيدروجين كان يستهلك فى إنتاج الهيليوم ، ويتبع ذلك انطلاق طاقة كتلة ، ويساعد فى هذه العملية الكربون والنتروجين والأكسيجين ، بحيث لا تتغير وفرتها النسبية ، وفيما يلى التفاعلات النووية المفروضة :

(١) $\text{ك}^{12}_{6} + \text{يد}^{1}_{1} \longrightarrow \text{ن}^{13}_{7}$

(٢) $\longrightarrow \text{ك}^{13}_{6} + \text{ش}^{0}_{+1}$

(٣) $\text{ك}^{13}_{6} + \text{يد}^{1}_{1} \longrightarrow \text{ن}^{14}_{7}$

(٤) $\text{ن}^{14}_{7} + \text{يد}^{1}_{1} \longrightarrow \text{ا}^{15}_{8}$

(٥) $\longrightarrow \text{ن}^{15}_{7} + \text{ش}^{0}_{+1}$

(٦) $\text{ن}^{15}_{7} + \text{يد}^{1}_{1} \longrightarrow \text{ك}^{12}_{6} + \text{هى}^{4}_{2}$

وتبلغ الطاقة المنطلقة فى تكوين كل ذرة هيليوم حوالى ٣٠ م . ا . ف ، ونلاحظ هنا أنه ، ولو أن أربعة بروتونات استخدمت فى التفاعلات ، إلا أن اثنين منها فقدا شخصيتهما بطريق غير مباشر للبوزيترونين ، ومن ثم أصبحا نيوترونين ، وتنشط عملية « احتراق » الأيدروجين هذه لإنتاج الهيليوم طاقة الحركة الكبيرة جداً والكثافة العالية جداً للمادة . (تقع درجة الحرارة داخل الشمس فى حدود ٢٠ مليون درجة ، وتبلغ الكثافة بضع مئات من الجرامات للسنتيمتر المكعب) ، وتوزع الثلاثون مليونا من الإلكترون فولت المنطلقة على جميع الجسيمات الداخلة فى التفاعل وبذلك تحفظ درجة الحرارة ، ويستمر التفاعل ما دام هناك إيدروجين .

وتستخدم دورة الاندماج النووى فى الشمس درجات الحرارة العالية كوسيلة للحث على انطلاق طاقة الكتلة . ولقد رأينا أن طاقة حركة شظايا الانشطار تقابل مثل هذه الدرجات الحرارية ، ولعله من الممكن ، إذن ، أن نستخدم فرنا يسخن مبدئياً بالانشطار ، ثم يستخدم الاندماج كوقود للاحتراق .

٢٩ ـ ١٢ المفاعل النووى كأداة بحث

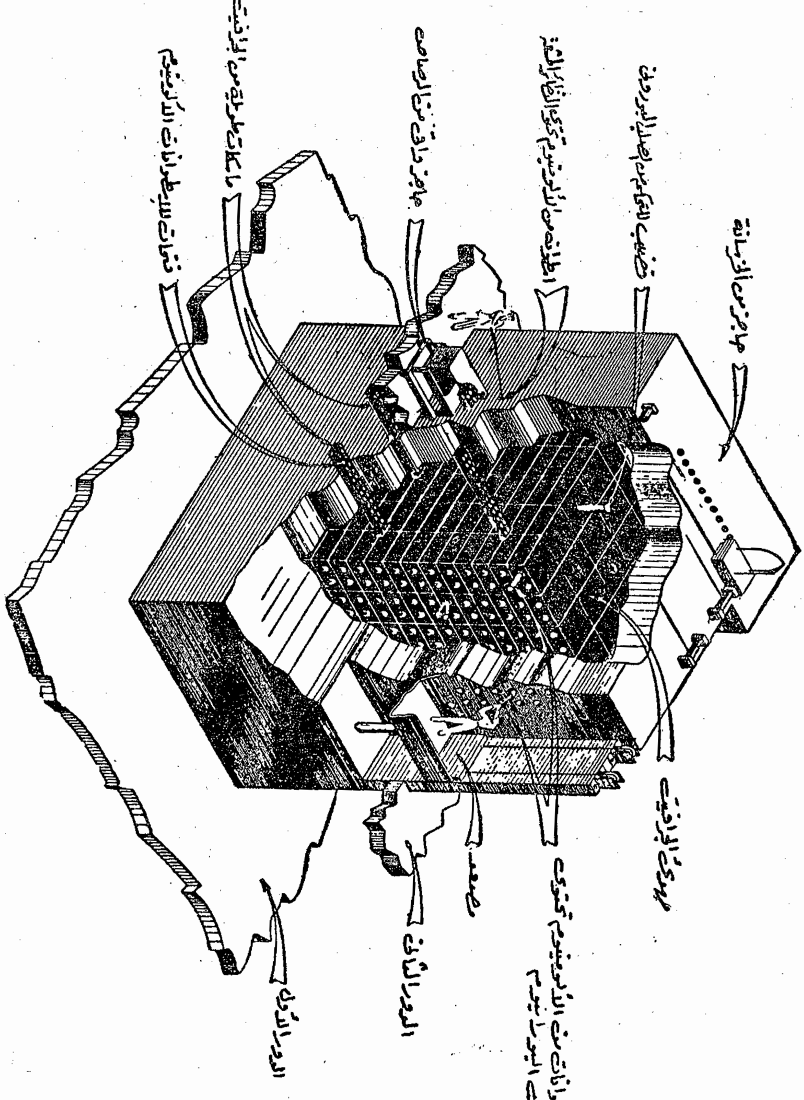
يلعب المفاعل النووى ثلاثة أدوار بنجاح تام : (١) فى صناعة البلوتونيوم القابل للانشطار ، (٢) كمولد لكميات ضخمة من الحرارة (فى درجات حرارة منخفضة نسبيًّا فى الوقت الحاضر) ، (٣) ، والإمداد بالنيوترونات السريعة منها والبطيئة . ولقد وضعته ظروف إقحامه فى وظيفته الأولى كسلاح حربى ، فى مرتبة خاصة قائمة بذاتها . وليست بظاهرة جديدة علينا أن يخلق العلم وسيلة يدمر بها نفسه والمجتمع ، فاكتشاف النار ، والمفرقعات الكيموية ، وطرق التحكم فى الميكروبات ، وأمثلة أخرى كثيرة كان يمكن أن تؤدى كلها إلى الهلاك الجماعي . فالإنسان يرى أنه من الأنسب أن يتنازل عن القليل من حقوقه الشخصية فى سبيل الحصول على الوقاية من أخيه الإنسان . وتمثل « القنبلة الذرية » مشكلة التحكم نفسها ، ولكنها جاءت بشدة مبالغ فيها جدًّا ، ولم تعد التضحية بالسيادة على نطاق الأفراد ، بل أصبحت ضرورة بالنسبة للشعوب ، والتنازل عن السيادة الوطنية أمر مؤلم ، ولكن يظهر أنه الحل الوحيد فى الظرف الحاضر .*

لقد ناقشنا باختصار استخدام المفاعل كمصدر للقوى ، ويجد من تقدم مفاعل القوى فى الوقت الحاضر ، التفاصيل الهندسية التكنولوجية فقط (وهى ليست تافهة بكل تأكيد) .

أما استخدام المفاعل كمولد للأعداد الضخمة من النيوترونات فيجعله أداة فعالة للبحث (شكل ٢٩ ـ ٥) ، فإذا وضع هدف داخل المهدئ تعرض لوابل القذائف من النيوترونات البطيئة والقريبة من البطيئة ، وتحول إلى مصدر مشع ذى شدة أكبر بكثير مما يمكن إنتاجه بوساطة أى نوع من معجلات الجسيمات . وإذا أريد الحصول على نيوترونات سريعة (تبلغ طاقتها بضعة ملايين إلكترون ڤولت) ، فإن شق قناة فى المهدئ يسمح لعدد كبير منها بالإفلات ، لأغراض استخدامها كقذائف . وعلى الرغم من أنه لا يزال يوجد الكثير مما يجب أن نعرفه

---

* هذا رأى شخصى للمؤلف ولا يوافق علية المترجم .


حاجز من الخرسانة
قضيب للتحكم من الصلب البوروني
اسطوانة من الألومنيوم تحوي النظائر المشعة
حاجز واقي من الرصاص
ماسكات طولية من الجرافيت
فتحات للإسطوانات الألومنيوم
مهدئ الجرافيت
اسطوانات من الألومنيوم تحتوي على اليورانيوم
مصعد
الدور الثاني
الدور الأول

(شكل ٢٩ - ٥)

فى فيزياء النيوترونات ، فإن أوفر استخدام للمفاعل فى الأبحاث إنتاجا ، كان حتى الآن ، فى إنتاج النوى المحولة . . المستقرة منها وغير المستقرة ، ولقد استعملت هذه النوى فى مجالات علمية كثيرة كمقتفيات مستقرة أو مشعة .

ولعل مثلا بسيطا يوضح لنا طريقة استخدام المقتفيات. فيكشف تحليل الدم عن وجود ملح الطعام (ص كل) فيه ، وهو يمتص بالطبع من الطعام الذى نأكله . وربما نتساءل عن الوقت اللازم لعملية الامتصاص هذه أو عن السرعة التى ينتشر بها الملح الحديث فى الدم كله . وتحليل عينة من الدم مأخوذة من طرف الأصبع يكشف عن وجود الدم ، ولكنه لا يفيد عن زمن دخوله فيه . و يمكن الإجابة عن التساؤل بسرعة وبدقة باستخدام (ص كل) المشع ، ولو أنه يتطابق كيمويا مع (ص كل) العادى إلا أنه يختلف عنه فيزيائيا . فإذا تعاطى شخص كمية صغيرة من (ص كل) المشع ، فإن عداد جيجر ، عندما يوضع قريبا من أطراف أصابع اليد أو القدم ، يبدأ فى تسجيل وجود المقتفى (ص كل) فى ظرف بضع دقائق تتراوح ما بين ثلاث وخمس دقائق . وتكشف تجربة أخرى مماثلة عن الحد الذى تركز إليه الغدة الدرقية اليود الذى يصل إليها . وهناك طريقة أخرى مشابهة ، وفيها يستخدم عنصر تختلف فيه نسبة الوفرة النظيرية عن الطبيعى ، ثم يستخدم مطياف الكتلة للكشف عن وجود الذرات « الموسومة » (بند ١٩ — ٨) .

ولقد لقى استخدام المقتفيات النظيرية والإشعاعية على نطاق واسع فى الطب وعلم البيولوجيا ، والكيميا والتعدين والفيزياء ، وفروع العلم الكثيرة الأخرى نجاحا كبيراً بتوافر الكميات الكبيرة من هذه المقتفيات المنتجة بفضل المفاعلات النووية . ولا تزال هذه الدراسات حتى الآن فى مرحلة طفولتها ، ولو أنها حققت فعلا ، نفعا عظيما .

مسائل

(١) ما هى درجة الحرارة التى تكافئ طاقة حركة شظية انشطار قدرها ١٠٠ م . ا . ف ؟

(الجواب : ٧٧٠ بليون درجة مطلقة)

(٢) ما هو متوسط طاقة النيوترون عند درجة ٤,٣° مطلقة (درجة حرارة إرسالة الهيليوم) ؟

(الجواب : ٨,٩ × ١٠^-١٦ إرجا أو ٠,٠٠٠٥٦ إلكترون ڤولت)

(٣) ما هو طول موجة « دى برولى » للنيوترون الوارد ذكره فى المثال رقم ٢ ؟

(الجواب : ١٢,١ انجشتروم)

(٤) ما هى درجة حرارة غاز من النيوترونات متوسط طاقتها إلكترون ڤولت واحد ؟

(الجواب : ٧٧٠٠° درجة مطلقة)

(٥) احسب كمية الطاقة المنطلقة فى التفاعل ن١٤ (ن ، ب) ك١٤ باعتبار النيوترون بطيئا .

(الجواب : ٠,٥٦ م . ا . ف)

(٦) احسب كتلة اليورانيوم بو٢٣٥ فى مول واحد (الوزن الجزيئى بالجرامات) من اليورانيوم الطبيعى .

(الجواب : ١,٧ جرام)

(٧) مفاعل نووى مثالى يستخدم فيه انشطار اليورانيوم ٢٣٥ لإنتاج البلوتونيوم بم٢٣٩ بدون فقد فى عدد النيوترونات الناتجة ، وينتج ١٠ جرام من بم٢٣٩ فى اليوم . احسب كمية الحرارة المتولدة فى اليوم (افرض تحرر نيوترونين فى الانشطار الواحد للنواة يو٢٣٥) .

(الجواب : ٦,٥ × ١٠^١١ جول أو ١,٨ × ١٠^٥ كيلووات ساعة)

مراجع مقترحة للاطلاع

CAMPBELL, J. W., "The Atomic Story" New York, Henry Holt & Co., 1947.

وصف صحفى لمشروع القنبلة الذرية ، واضح وسهل القراءة .

GAMOW, GEORGE, "Atomic Energy in Cosmic & Human Life," New York. The Macmillan Co., 1946.

لجامو أسلوب بارع فى جعل علم الفيزياء يقرأ كأنه رواية أخاذة . ويتضمن هذا الكتاب الصغير مناقشة واضحة لدورة الاندماج النووى فى الشمس .

HECHT, SELIG, "Explaining the Atom", New York, Viking Press, 1947.

تعطى الأبواب من الخامس إلى الثامن وصفا جميلا للانشطار والقنبلة .

SMYTH, H., "Atomic Energy for Military Purposes," Princeton University Press. 1945.

لا يزال تقرير سميث الشهير يعتبر أحسن قصة لتطور تطبيقات الانشطار النووى أثناء الحرب العالمية الثانية .

« جداول »

الجدول (١)

القيم التقريبية للثوابت الفيزيائية

ثابت الجاذبية (ج)	= ٦,٦٧ × $١٠^{-٨}$ سم^{٣} / جم – ثانية^{٢}
عجلة الجاذبية الأرضية العيارية (حـ)	= ٩٨١ سم / (ثانية)^{٢}
الضغط الجوى العيارى (ض)	= ١,٠١ × $١٠^{٦}$ داين / سم^{٢}
الصفر المطلق	= – ٢٧٣° مئوية
عدد أفوجادرو (ن)	= ٦,٠٢ × $١٠^{٢٣}$
الحجم الجزيئى (حجم المول) عند الضغط ودرجة الحرارة العيارين	= ٢٢٤٠٠ سم^{٣}
ثابت الغاز للمول (م)	= ٨,٣١ × $١٠^{٧}$ إرج / درجة مطلقة
سرعة الضوء فى الفراغ ء	= ٣,٠٠ × $١٠^{١٠}$ سم / ثانية
نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته ($\frac{ش}{ك}$)	= ١٧,٦ × $١٠^{٧}$ كولوم / جرام
	= ٥,٢٧ × $١٠^{١٧}$ وحدة استاتيكية/جرام
الشحنة الإلكترونية (ش)	= – ٤,٨٠ × $١٠^{-١٠}$ وحدة إلكتروستاتيكية
	= – ١٦,٠ × $١٠^{-٢٠}$ كولوم
كتلة الإلكترون الساكنة (ك)	= ٩,١١ × $١٠^{-٢٨}$ جرام
طاقة الإلكترون فولت (ا ف)	= ١٦,٠ × $١٠^{-١٣}$ إرج
وحدة الكتلة الذرية (وك)	= ١,٦٦ × $١٠^{-٢٤}$ جرام
نسبة كتلة ذرة الأيدروجين (يد$_{١}$^{١}) إلى الإلكترون	= ١٨٣٧
الطاقة المكافئة لوحدة الكتلة الذرية	= ٩٣١ م . ا . ف
ثابت بلانك h	= ٦,٦٢ × $١٠^{-٢٧}$ إرج – ثانية
طول موجة كومتن ($\frac{h}{ك ث}$)	= ٠,٠٢٤٣ × $١٠^{-٨}$ سم

هذا الجدول صورة معدلة من الجدول الذى نشره ر . ت . بيرج R. T. Birge فى مجلة الفيزياء الحديثة عام ١٩٤١

الجدول (ب)

الوحدات ومعاملات التحويل

الوحدات الديناميكية

١ بوصة	= ٢,٥٤ سم
١ ميل	= ١,٦١ كيلومترا
١ كوارت (ربع جالون)	= ٠,٩٤٦ لترا = ٩٤٦ سم^{٣}
١ باوند	= ٤٥٤ جراما
١ ميل / الساعة	= ٤٤,٧ سم / ثانية
١ جول	= ١٠^{٧} إرج
١ وات	= ١٠^{٧} إرج / ثانية
١ انجشتروم	= ١٠ سم

الوحدات الكهربية

١ كولوم	= ٣ × ١٠^{٩} وحدة إلكتروستاتيكية للشحنة (وحدة نظرية مطلقة)
١ أمبير	= ٣ ــ ١٠^{٩} وحدة إلكتروستاتيكية للتيار (وحدة نظرية مطلقة)
١ فولت	= $\frac{١}{٣٠٠}$ وحدة إلكتروستاتيكية للجهد (وحدة نظريةمطلقة)
١ أوم	= $\frac{١}{٩}$ × ١٠$^{-١١}$ وحدة للمقاومة (وحدة نظريةمطلقة)
١ أورستد	= $\frac{١}{٣}$ × ١٠$^{-١٠}$ إلكتروستاتيكية لشدة المجال المغنطيسى

الجدول (ح)

العنصر	الرمز	العدد الذرى	الكتلة
أرجون	جن	١٨	٣٩,٩
أستاتين *	تن	٨٥	٢١٠
أسترونشيوم	ست	٣٨	٨٧,٦
أكتينيوم *	كت	٨٩	٢٢٧
أكسيجين	أ	٨	١٦
ألومنيوم	لو	١٣	٢٧,٠
أمريكيوم *	ملك	٩٥	٢٤١
أنتيمون	نت	٥١	١٢١,٨
أنديوم	ند	٤٩	١١٤,٧
أوروبيوم	رو	٦٣	١٥٢
أوزميوم	مى	٧٦	١٩٠,٢
إيتربيوم	تر	٧٠	١٧٣,٠
الأيتريوم	يت	٣٩	٨٨,٩
أيدروجين	يد	١	١,٠
أيربيوم	يب	٦٨	١٦٧,٢
أيريديوم	ير	٧٧	١٩٣,١
أينشتينيوم *	ش	٩٩	٢٥٣
باريوم	با	٥٦	١٣٧,٤
بالاديوم	بل	٤٦	١٠٦,٧
برازيوديميوم	بر	٥٩	١٤٠,٩
بركيليوم *	بك	٩٧	٢٤٣
بروتاكتينيوم	بن	٩١	٢٣١
بورون	ب	٥	١٠,٨
بروم	بر	٣٥	٧٩,٩
بريليوم	ج	٤	٩
بزموت	بز	٨٣	٢٠٩,٠

العنصر	الرمز	العدد الذرى	الكتلة
بلاتين	بلا	٧٨	١٩٥,٢
بلوتونيوم	بت	٩٤	٢٣٩
بوتاسيوم	بو	١٩	٣٩,١
بولونيوم *	لن	٨٤	٢١٢
بركيليوم *	بك	٩٧	٢٤٣
تانتال	تا	٧٣	١٨٠,٩
تربيوم	ت	٦٥	١٥٩,٢
تللور	لل	٥٢	١٢٧,٦
تكنيتيوم	تك	٤٣	٩٩
تنجستن	تو	٧٤	١٨٣,٩
تيتان	تى	٢٢	٤٧,٩
ثاليوم	ثا	٨١	٢٠٤,٤
ثوريوم *	ث	٩٠	٢٣٢,١
تيوليوم	ثو	٦٩	١٦٩,٤
جادولينيوم	جد	٦٤	١٥٦,٩
جاليوم	جا	٣١	٦٩,٧
جرمانيوم	جر	٣٢	٧٢,٦
حديد	ح	٢٦	٥٥,٩
خارصين	خ	٣٠	٦٥,٤
ديسبروزيوم	سب	٦٦	١٦٢,٥
ذهب	ذ	٧٩	١٩٧,٢
رادون *	شع	٨٦	٢٢٢
راديوم *	ش	٨٨	٢٢٦,١
رصاص	ر	٨٢	٢٠٧,٢
روبيديوم	و	٣٧	٨٥,٥
روثينيوم	ين	٤٤	١٠١,٧
روديوم	د	٤٥	١٠٢,٩

العنصر	الرمز	العدد الذرى	الكتلة
رينيوم	ـم	٧٥	١٨٦,٣
زئبق	ـے	٨٠	٢٠٠,٦
زركون	كن	٤٠	٩١,٢
زرنيخ	ز	٣٣	٧٤,٩
زينون	نو	٥٤	١٣١,٣
سكانديوم	سك	٢١	٤٥,١
سماريوم	سا	٦٢	١٥٠,٤
سيريوم	سر	٥٨	١٤٠,١
سيزيوم	سز	٥٥	١٣٢,٩
سيليكون	س	١٤	٢٨,١
سيلينيوم	سل	٣٤	٧٩,٠
صوديوم	ص	١١	٢٣,٠
فاناديوم	فا	٢٣	٥١,٠
فرانسيوم *	فر	٨٧	٢٢٧,٠
فسفور	فو	١٥	٣١
فضة	ف	٤٧	١٠٧,٩
فلور	فل	٩	١٩
فيرميوم	فم	١٠٠	٢٥٤
قصدير	ق	٥٠	١١٨,٧
كادميوم	كد	٤٨	١١٢,٤
كاليفورنيوم *	كف	٩٨	٢٤٤
كبريت	كب	١٦	٣٢,١
كربون	ك	٦	١٢
كروم	كر	٢٤	٥٢
كربيتون	ك	٣٦	٨٣,٧

العنصر	الرمز	العدد الذرى	الكتلة
كلسيوم	كا	٢٠	٤٠,١
كلور	كل	١٧	٣٥,٥
كوبلت	كو	٢٧	٥٨,٩
كوريوم *	كى	٩٦	٢٤٢
لانثان	لا	٥٧	١٣٨,٩
ليثيوم	ل	٣	٦,٩
لوتيسيوم	لت	٧١	١٧٥
مغنيسيوم	ما	١٢	٢٤,٣
منجنيز	من	٢٥	٥٣,٩
مندليفيوم *	مد	١٠١	٢٥٦
موليبدنوم	مو	٤٢	٩٦
نبتونيوم *	نب	٩٣	٢٣٧
نتروجين	ن	٧	١٤
نيكل	نى	٢٨	٥٨,٧
نحاس	نح	٢٩	٦٣,٥
نوبيليوم	نل	١٠٢	٢٥٣
نيوبيوم	كم	٤١	٩٢,٩
نيوديميوم	نم	٦٠	١٤٤,٣
نيون	نن	١٠	٢٠,٢
هافنيوم	ها	٧٢	١٧٨,٦
هوليوم	هو	٦٧	١٦٤,٩
هيليوم	هـ	٢	٤,٠
يود	ى	٥٣	١٢٦,٩
يورانيوم *	يو	٩٢	٢٣٨,١

الجدول (د)

نظائر العناصر الخفيفة*

ذ	العنصر	العدد الكتلى	الكتلة النظيرية (وحدة كتلة)	الوفرة النسبية ٪	عمر النصف
٠	ش	صفر	,٠٠٠٥٤٨		
٠	ن	١	(١,٠٠٨٩٤)		٠,٥ ساعة
١	يد	١	١,٠٠٨١٣	٩٩,٩٨٤	
		٢	٢,٠١٤٧٢	٠,٠١٦	
		٣	(٣,٠١٧٠٠)		١٢ عاما
٢	هـ	٣	٣,٠١٦٩٩	$١٠^{-٤}$	
		٤	٤,٠٠٣٨٥	١٠٠	
٣		٦	(٦,٠٢٠٩)		٠,٨ ثانية
٣	ل	٦	٦,٠١٦٩٢	٧,٣٩	
		٧	٧,٠١٨١٦	٩٢,٦١	
		٨	(٨,٠٢٤٩٧)		٠,٨٨ ثانية
٤	ج	٧	(٧,٠١٩٠٩)		٥٠ يوما
		٨	(٨,٠٠٧٨١)		$١٠^{-١٥}$ ثانية
		٩	٩,٠١٤٩٦	١٠٠	٢×١٠^{٦} أعوام
		١٠	١٠,٠١٦٦٢		
٥	ب	١٠	١٠,٠١٦١٧	١٨,٨٣	
		١١	١١,٠١٢٩٠	٨١,١٧	
		١٢	(١٢,٠١٦٨)		٠,٠٢ ثانية
٦	ك	١٠	(١٠,٠٢٠٩)		٢٠ ثانية
		١١	(١١,٠١٥٠٢)		٢٠ دقيقة
		١٢	١٢,٠٠٣٨٨	٩٨,٩	
		١٣	١٣,٠٠٧٥٦	١,١	
		١٤	(١٤,٠٠٧٧٤)		٦٠٠٠ عام

* مأخوذ مع التعديل عن جداول الفيزياء النووية التى جمعها ماثاوخ J. Mattauch وعن الجداول التى نشرها سيبرج وبيرلمان G.T. Seaborg & Perlman فى مجلة الفيزياء الحديثة — أكتوبر ١٩٤٨ .

ذ	العنصر	العدد الكتلى	الكتلة النظيرية (وحدة الكتلة)	الوفرة النسبية ٪	عمر النصف
٧	ن	١٣	(١٣,٠٠٩٩٠)		١٠ دقائق
		١٤	١٤,٠٠٧٥٣	٩٩,٦٢	
		١٥	١٥,٠٠٤٨٧	٠,٣٨	
		١٦	(١٦,٠١١)		٧,٤ ثانية
		١٧	(١٧,٠١٢)		٤ ثوان
٨	ا	١٤	(١٤,٠١)		٧٦ ثانية
		١٥	(١٥,٠٠٧٨)		١٢٦ ثانية
		١٦	١٦,٠٠٠٠٠	٩٩,٧٥٧	
		١٧	١٧,٠٠٤٥٠	٠,٠٣٩	
		١٨	١٨,٠٠٤٨٥	٠,٠٢٠٤	
		١٩	(١٩,٠٠٩٣٧)		٢٩ ثانية
٩	فل	١٧	(١٧,٠٠٧٥٨)		٧٠ ثانية
		١٨	(١٨,٠٠٦٧٠)		١١٢ دقيقة
		١٩	١٩,٠٠٤٥٤	١٠٠	
		٢٠	(٢٠,٠٠٦٥)		١٢ ثانية
١٠	نن	١٩	(١٩,٠٠٧٩٨)		٢٠ ثانية
		٢٠	١٩,٩٩٨٨٩	٩٠,٥١	
		٢١	٢١,٠٠٠٠٢	٠,٢٨	
		٢٢	٢١,٩٩٨٥٨	٩٢١	
		٢٣	(٢٣,٠٠٠٨٤)		١٠ ثوان
١١	ص	٢١	(٢١,٠٠٣٥)		٢٣ ثانية
		٢٢	(٢٢,٠٠٠٣٢)		٣ أعوام
		٢٣	٢٢,٩٩٦٤٤	١٠٠	
		٢٤	(٢٣,٩٩٧٧٤)		٨ ١٤ ساعة
		٢٥	(٢٤,٩٩٧٧١)		٦٠ ثانية
١٢	ما	٢٣	(٢٣,٠٠٠٦)		١١,٦ ثانية
		٢٤	٢٣,٩٩٣٠	٧٨,٦٠	
		٢٥	٢٤,٩٩٤٦	١٠,١١	

ذ	العنصر	العدد الكتلى	الكتلة النظيرية (وحدة كتلة)	الوفرة النسبية ٪	عمر النصف
		٢٦	٢٥,٩٩٠١	١١,٢٩	
		٢٧	(٢٦,٩٩٢٦)		١٠ دقائق
١٣	لو	٢٥	(٢٤,٩٩٨)		٨ ثوان
		٢٦	(٢٥,٩٩٤٤)		٦ ثوان
		٢٧	٢٦,٩٩٠٧	١٠٠	
		٢٨	(٢٧,٩٩٠٨)		٢,٣ دقيقة
		٢٩	(٢٨,٩٨٩٢)		٦,٧ دقيقة
١٤	س	٢٧	(٢٦,٩٩٦١)		٤,٩ ثانية
		٢٨	٢٧,٩٨٧٢	٩٢,٢٨	
		٢٩	٢٨,٩٨٦٥	٤,٦٧	
		٣٠	٢٩,٩٨٤٠	٣,٠٥	
		٣١	(٣٠,٩٨٦٦)		٣ ساعة
١٥	فو	٢٩	(٢٨,٩٩١٥)		٤,٦ ثانية
		٣٠	(٢٩,٩٨٨٥)		٢,٥ دقيقة
		٣١	٣٠,٩٨٤٤	١٠٠	
		٣٢	(٣١,٩٨٤٤)		١٤ يوما
		٣٤	(٣٣,٩٨٤٣)		١٢ ثانية
١٦	كب	٣١	(٣٠,٩٨٩٦)		٣ ثوان
		٣٢	٣١,٩٨٢٥	٩٥,٠٦	
		٣٣	٣٢,٩٨١٩	,٧٤	
		٣٤	٣٣,٩٧٩٨	,٤٨	
		٣٥	(٣٤,٩٧٩٠)		٨٧ يوما
		٣٦	٣٥,٩٧٨٠	,٠١٦	
		٣٧	(٣٦,٩٨٢٣)		٥ دقائق
١٧	كل	٣٣	(٣٢,٩٨٥٧)		٢,٥ ثانية
		٣٤	(٣٣,٩٨٣٧)		٣٣ دقيقة
		٣٥	٣٤,٩٧٨٨	٧٥,٤	
		٣٦	(٣٥,٩٧٨٠)		$١٠^{٦}$ أعوام

ذ	العنصر	العدد الكتلى	الكتلة النظيرية (وحدة كتلة)	الوفرة النسبية	عمر النصف
		٣٧	٣٦,٩٧٧٧	٢٤,٦	
		٣٨	(٣٧,٩٨٠٠)		٣٨ دقيقة
		٣٩	(٣٨,٩٨)		١ ساعة
١٨	جن	٣٥	(٣٤,٩٨٤٧)		١,٩ ثانية
		٣٦	٣٥,٩٧٧٣	,٣٠٧	
		٣٧	٣٦,٩٧٨		٣٤ يوما
		٣٨	٣٧,٩٧٤٦	,٠٦٠	
		٣٩	(٣٨,٩٨)		٤ دقائق
		٤٠	٣٩,٩٧٥٥	٩٩,٦٣٣	
		٤١	(٤٠,٩٧٧٤)		١١٠ دقائق

الجدول (و)

الحروف الهجائية اليونانية

ألفا	A ، α	نيو	N ، ν
بيتا	B ، β	اكساى	Ξ ، ξ
جاما	Γ ، γ	أوميكرون	O ، o
دلتا	Δ ، δ	باى	Π ، π
بسليون	E ، ε	رو	P ، ρ
زيتا	Z ، ζ	سيجما	Σ ، σ
ايتا	H ، η	تو	Τ ، τ
ثيتا	Θ ، θ	أوبسيلون	Υ ، υ
يوتا	I ، ι	فاى	Φ ، φ
كابا	K ، κ	كاى	X ، χ
لامدا	Λ ، λ	بساى	Ψ ، ψ
ميو	Μ ، μ	أوميجا	Ω ، ω

قائمة المصطلحات

A

Abundance	الوفرة
Absorption Spectra	طيف الامتصاص
Accelerators	المعجلات
Alternating Current	التيار المتبدل
Ampletude of Wave	سعة الموجة
Amplification	التضخيم
Anode	الأنود (المصعد)
Avarage Velocity	السرعة المتوسطة

C

Caloric	السعر
Clasters in Ferrowmagnetism	الأسراب فى المغنطيسية الحديدية
Collusion	التصادم
Conservation	البقاء
Cosmic rays	الأشعة السينية
Critical Volume	الحجم الحرج

D

Degradation	الاضمحلال
Differaction	الحيود
Diode tube	الصمام الثنائى

Direct Current	التيار المستمر
Displacement	الإزاحة
Dissipative force	القوة المضيعة

E

Electrodynamics	الديناميكا الكهربية
Electrolysis	التحليل الكهربى
Electromagnetic induction	الحث الكهرومغنطيسى
Electromotive force	القوة الدافعة الكهربية
Electronics	الإلكترونيات
Electrostatic Potential	الجهد الإلكتروستاتيكى
Endothermic	الحرارة الداخلية
Equilibrium Concept	فكرة الاتزان
Exothermic	الحرارة الخارجية

F

Fission	الانشطار
Fluorescence	الخاصية الفلورنسية
Frequency	التردد
Friction	الاحتكاك

G

Gram - atom	الوزن الذرى بالجرام
Gram - molecule	الوزن الجزيئى بالجرام
Ground - State	الحالة الصفرية

H

Half - life	عمر النصف

I

Induction	الحث
Inertia	القصور الذاتى
Inference of light	تداخل الأضواء
Inference role	دور الاستنتاج
Intantaneous Velocity	السرعة اللحظية
Interaction	التفاعل
Interferometer	جهاز قياس التداخل
Ionization	التأين
Isotopes	النظائر

M

Macrophysics	الماكروفيزياء (فيزياء الأجسام الكبيرة)
Microphysics	الميكروفيزياء (فيزياء الأجسام الصغيرة)
Molecules	الجزيئات
Monochromatic light	الضوء ذو اللون الواحد
Nuclear fusion	الاندماج النووى
Nucleonics	النوويات

O

Order	رتبة

P

Particles	الجسيمات
Periodic Motion	الحركة الدورية
Photoelectric Work	الشغل الفوتوكهربى (الكهروضوئى)
Photoelectrons	الإلكترونات الفوتونية
Pile	ركامة
Polanization of Waves	استقطاب الموجات
Power	القدرة
Probability	الاحتمالية

Q

Quantization	خاصية الكم
Quantum Mechanics	ميكانيكا الكم

R

easoning in Science	الاستدلال فى العلم

S

Spectrometer	المطياف
Spinning electrons	الإلكترون اللفاف

T

Terminal Velocity	السرعة الهائية
Thermionic emission	الانبعاث الثرميونى
Triode tube	الصمام الثلاثى

U

Uniform Velocity	السرعة المنتظمة

V

Valance electron	إلكترون التكافؤ
Valance Orbits	مدارات التكافؤ
Voltage Signal	إشارة الجهد

Y

Yoke of electromagnets	أذرع المغنطيس

الفهرس

(أ)

(ب)

(ت)

Electromotive force, definition of	تعريف القوة الدافعة الكهربية ٢٢٤
in series	القوة الدافعة الكهربية فى حالة التوصيل على التوالى ٢٢٦
induced	القوة الدافعة الكهربية المنتجة بالحث ٢٦٢
Density, definition	تعريف الكثافة ١٤٠
of earth	كثافة الأرض ٩٢
of mercury	كثافة الزئبق ١٤٢
Inertial system, definition	تعريف المجموعة الميكانيكية ذات القصور الذاتى (ذات الكتلة) ٦٤
relativistic treatment of	معالجة المجموعة الميكانيكية ذات القصور الذاتى فى النظرية النسبية ٣٥١
Watt, definition of	تعريف الوات ١١٥
unit of electronical power	الوات ، وحدة القدرة الكهربية ٢١٥
Gram-molecule, definition of	تعريف الوزن الجزيئى بالجرام ١٣٨
Gram-atom, definition of	تعريف الوزن الذرى بالجرام ١٣٨
Interaction of electric currents	التفاعل بين التيارات الكهربية ٢٣٩
Exothermic Nuclear Reactions	التفاعل النووى ذو الحرارة الخارجية ٤٨٧ — ٤٩٠
Endothermic Noclear Reactions	التفاعل النووى ذو الحرارة الداخلية ٤٨٧ — ٤٩٠
Photo disintegrations of deuteron	تفتت الديترون بالفوتونات ٤٨٩
Voltage, amplification	تفخيم الجهد (تكبير الجهد) ٢٨٧
signal	اشارة الجهد ٢٨٦

(د)

(ذ)

(ر)

(ز)

(س)

(ش)

(ص)

(ض)

(ط)

(ك)

(م)

(ن)

(و)

تم طبع هذا الكتاب على مطابع
دار المعارف بمصر سنة ١٩٦٢

هذا الكتاب

يعطى هذا الكتاب صورة مبسطة متكاملة عن المبادئ الأساسية للفيزياء الذرية وضح فيها المنطق السليم والتفكير العميق ، فخرجت صورة شائقة جمعت بين دسامة المادة وسهولة العرض ، وجدة الفكرة .

ولقد نجح مؤلفا هذا الكتاب فى إبراز جوانب هذه الصورة، فألقيا الأضواء على ناحية خاصة من العلم الحديث شغلت الرأى العام المثقف والمجتمع الإنسانى بصفة عامة بما أحدثته من آثار سياسية واجتماعية واقتصادية بعيدة المدى .